



Nuno Miguel Mendes da  
Silva Teixeira Homem

**Estratégias Automáticas de Modelação em Processos de  
Engenharia Inversa**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **O júri**

Presidente

**Professor Doutor Robertt Angelo Fontes Valente**

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professor Doutor Paulo Miguel de Jesus Dias**

Professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Orientador

**Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas**

Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Co-orientador

**Professor Doutor António Manuel de Amaral Ramos**

Professor auxiliar convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **Agradecimentos**

Agradeço, em primeiro lugar, ao Professor Doutor Carlos Relvas a orientação do trabalho de que resulta a presente dissertação. Além de uma disponibilidade constante, o seu permanente espírito crítico foi não só fundamental na realização deste trabalho como também ao nível do meu desenvolvimento científico e pessoal.

Seguidamente, agradeço ao Professor Doutor António Ramos a co-orientação deste trabalho e o apoio disponibilizado na sua realização.

Agradeço também ao Renato Cabete da Protosys - Prestação de Serviços de Engenharia, a ajuda cedida na parte final do trabalho, nomeadamente no que diz respeito ao controlo dimensional.

Aos meus colegas, pela constante boa disposição e troca de ideias.

Finalmente agradeço aos meus pais e à Denise os conselhos e o apoio incondicional, fundamentais para a realização deste trabalho.

**Palavras-Chave:** Engenharia inversa, Modelação 3D, Geração Automática de Superfícies, Controlo Dimensional

## **Resumo**

O processo de obtenção de um modelo 3D digital que reproduza de forma fiel e com precisão o modelo físico original está directamente relacionado com a tecnologia utilizada, no entanto, frequentemente o resultado pode ser distinto do pretendido, devido ao método de tratamento e processamento de dados estabelecido pelo técnico de CAD. O objectivo deste estudo foi avaliar a variabilidade geométrica e precisão de modelos tridimensionais gerados por levantamento de forma, através de digitalização por laser e construídos em sistemas CAD 3D.

Como elementos de estudo foram utilizados: uma réplica de mandíbula humana (sawbones<sup>®</sup>) que representa uma geometria complexa livre e duas bolas de pingue-pongue e um paralelepípedo para representar os elementos de geometria regular. O processo de aquisição de pontos foi executado através de varrimento laser 3D (Roland LPX 250) e para o tratamento da nuvem de pontos, geração da malha de triângulos, geração das superfícies e reconstrução do modelo digital recorreu-se a duas aplicações CAD 3D distintas, CATIA V5R19 e SolidWorks 2009, ambas da Dassault Systèmes. Os modelos digitais obtidos foram posteriormente comparados com o modelo físico original, em termos geométricos e dimensionais. Para o efeito foi utilizado uma máquina de medição por coordenadas CNC (Maxim, Aberlink, UK) e a aplicação PowerInspect (Delcam, Birmingham, UK).

Com este trabalho foi possível estabelecer uma metodologia de tratamento e processamento computacional para a reconstrução de modelos 3D, cujo resultado permite a reprodução fiel e precisa do modelo original, ou seja, os modelos digitais obtidos reproduzem de forma precisa o modelo físico original.

**Keywords:** Reverse Engineering, 3D Modeling, Automatic Surface Generation, Dimensional Control

## **Abstract**

The process to obtain a digital 3D model that reproduces faithfully and accurately the original physical model is directly related to the technology in use, however the result can be different from the desired due to the method of manipulation and processing data established by the CAD operator. The aim of this study was to evaluate the geometric variability and the accuracy of three-dimensional models generated by data acquisition, digitized by a laser scanner and built in 3D CAD systems.

The study components used were: a replica of a human jaw (sawbones<sup>®</sup>) representing a free and complex geometry; two ping-pong balls and a parallelepiped were chosen as regular geometry models. The data acquisition process was performed by a 3D laser scanner (Roland LPX 250) and for the treatment of point clouds, generation of triangles meshes and surfaces two different CAD applications were used: CATIA V5R19 and SolidWorks 2009, both from Dassault Systèmes. The digital models obtained were then compared with the original physical model, concerning geometrical and dimensional features. To accomplish this task a coordinate measuring machine CNC (Maxim, Aberlink, UK) was used in addition to the software application, PowerInspect (Delcam, Birmingham, UK).

With this works a methodology of treatment and computer processing to reconstruct 3D models was established, which allows the faithful and accurate reproduction of the original model. The digital models obtained accurately reproduce the physical model.

## Índice Geral

Objectivos.....	xiii
Introdução .....	xiv
1    ENGENHARIA INVERSA .....	1
2    PROJECTO ASSISTIDO POR COMPUTADOR.....	7
3    METODOLOGIA E TECNOLOGIAS DE SUPORTE .....	13
4    ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE CATIA .....	19
5    ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE SOLIDWORKS.....	53
6    COMPARAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO FÍSICO ORIGINAL.....	69
7    CONCLUSÕES GERAIS.....	75
REFERÊNCIAS .....	77

# Índice de Texto

Índice Geral .....	iii
Índice de Texto .....	v
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Objectivos.....	xiii
Introdução .....	xiv
<b>1 ENGENHARIA INVERSA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução.....	1
1.2 O processo de Engenharia Inversa .....	1
1.3 A utilização da Engenharia Inversa .....	3
1.4 Processos de aquisição de forma .....	3
<b>2 PROJECTO ASSISTIDO POR COMPUTADOR.....</b>	<b>7</b>
2.1 Desenho Assistido por Computador (CAD) .....	7
2.1.1 Elementos de modelação: sólidos e superfícies .....	8
2.2 Projecto distribuído, geração e transferência de ficheiros .....	10
<b>3 METODOLOGIA E TECNOLOGIAS DE SUPORTE .....</b>	<b>13</b>
3.1 Materiais e Métodos .....	13
3.2 Tecnologias de levantamento de forma .....	13
3.3 Ferramentas de modelação 3D .....	16
3.4 Tecnologia de controlo dimensional .....	17
<b>4 ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE CATIA .....</b>	<b>19</b>
4.1 Estudo realizado.....	19
4.1.1 Apresentação de resultados .....	19
4.1.2 Metodologia .....	19
4.2 Definição dos comandos utilizados.....	23
4.2.1 Tratamento da nuvem de pontos .....	23
4.2.2 Criação e tratamento da malha de triângulos .....	24
4.2.1 Geração da superfície .....	26
4.3 Definição dos parâmetros analisados .....	26
4.4 Estudo de formas irregulares .....	27
4.4.1 Resumo dos estudos realizados.....	27
4.4.2 Nomenclatura utilizada .....	28
4.4.3 Utilização de filtro na nuvem de pontos inicial .....	28

4.4.4	Suavização da malha de triângulos.....	30
4.4.5	Optimização da malha de triângulos .....	34
4.4.6	Análise da resolução da superfície .....	37
4.4.7	Análise do desvio médio limite da superfície .....	39
4.5	Estudo de superfícies de formas regulares .....	41
4.5.1	Resumo dos estudos realizados.....	41
4.5.1	Utilização de filtro em formas regulares .....	42
4.5.2	Reconhecimento da forma geométrica .....	45
4.5.3	Suavização de formas regulares .....	46
4.5.4	Optimização de formas regulares.....	48
4.6	Conclusões sobre o estudo realizado no software CATIA .....	51
<b>5</b>	<b>ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE SOLIDWORKS.....</b>	<b>53</b>
5.1	Estudo realizado.....	53
5.1.1	Apresentação dos resultados .....	53
5.1.2	Metodologia .....	53
5.2	Definição dos comandos utilizados.....	55
5.2.1	Tratamento da nuvem de pontos.....	55
5.2.2	Criação da malha de triângulos .....	55
5.2.3	Geração da superfície .....	55
5.3	Definição dos parâmetros analisados .....	56
5.4	Estudo de formas irregulares .....	57
5.4.1	Resumo dos estudos realizados.....	57
5.4.2	Tratamento da nuvem de pontos .....	57
5.4.3	Simplificação da nuvem de pontos.....	58
5.4.4	Suavização da malha de triângulos.....	60
5.4.5	Resolução da superfície .....	62
5.5	Resultados e análise da geração de superfícies de formas regulares .....	63
5.5.1	Resumo do estudo realizado .....	63
5.5.2	Remoção de ruído em formas regulares .....	63
5.5.3	Suavização de formas regulares .....	65
5.6	Conclusões sobre o estudo realizado no software SolidWorks .....	67
<b>6</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO FÍSICO ORIGINAL.....</b>	<b>69</b>
6.1	Metodologia.....	69
6.1.1	Processo de alinhamento dos modelos .....	69
6.1.2	Processo de inspeção e obtenção de resultados .....	70
6.2	Conclusões .....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>75</b>



REFERÊNCIAS .....77

## Índice de Figuras

Figura 1.1: Integração da engenharia inversa no processo produtivo (Alves 2004) .....	2
Figura 1.2: Diagrama explicativo dos vários métodos de levantamento de forma (adaptado de Vukasinovic, Kolsek et al., 2007) .....	5
Figura 3.2: Objecto de estudo .....	15
Figura 3.1: Scanner Roland LPX-250 .....	15
Figura 3.3: Medição por coordenadas: a) CMM utilizada neste trabalho e b) Disposição do objecto de estudo na CMM.....	18
Figura 3.4: Especificações da CMM (Aberlink) .....	18
Figura 4.1: Procedimento para a geração de superfícies no CATIA.....	20
Figura 4.2: Primeira e segunda fase da geração de superfícies.....	21
Figura 4.3: Segunda e terceira fase da geração de superfícies .....	22
Figura 4.4: Critério para a remoção de pontos na utilização do filtro homogéneo (Hnátík, 2007).....	23
Figura 4.5: Ilustração da medição do erro cordal (Soni, Chen et al., 2008).....	23
Figura 4.6: Suavização da malha de triângulos no CATIA: a) aspecto granular e b) aspecto suavizado.....	25
Figura 4.7: Optimização da malha de triângulos no CATIA: a) malha não optimizada e b) malha optimizada .....	25
Figura 4.8: Processo de criação de superfícies no CATIA .....	26
Figura 4.9: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial.....	30
Figura 4.10: Análise do efeito de suavização na malha sem utilização de filtro .....	31
Figura 4.11: Análise do efeito de suavização na malha com filtro adaptativo 30% .....	32
Figura 4.12: Análise do efeito de suavização na malha com filtro homogéneo 10% .....	33
Figura 4.13: Análise do efeito de optimização na malha sem utilização de filtro .....	35
Figura 4.14: Análise do efeito de optimização na malha com filtro adaptativo 30% .....	36
Figura 4.15: Análise do efeito de optimização na malha com filtro homogéneo 10%.....	36
Figura 4.16: Análise do aumento da resolução da superfície na malha sem filtro.....	38
Figura 4.17: Análise da diminuição do desvio médio limite na malha sem filtro .....	40
Figura 4.18: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial da esfera .....	43
Figura 4.19: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial do plano.....	44
Figura 4.20: Análise da utilização do reconhecimento esférico em relação ao automático .....	46
Figura 4.21: Análise do efeito de suavização da malha sem filtro do modelo esférico.....	47
Figura 4.22: Análise do efeito de suavização na malha sem filtro do modelo plano .....	48
Figura 4.23: Análise do efeito de optimização na malha sem filtro do modelo esférico .....	50
Figura 4.24: Análise do efeito de optimização da malha sem filtro do modelo plano .....	50
Figura 5.1: Procedimento para a geração de superfícies no SolidWorks.....	54
Figura 5.2: Suavização da malha de triângulos no SolidWorks: a) malha não suavizada e b) malha suavizada .....	55
Figura 5.3: Processo de geração de superfícies no SolidWorks.....	56

Figura 5.4: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial.....	58
Figura 5.5: Análise da utilização de simplificação curva da nuvem de pontos inicial.....	59
Figura 5.6: Análise do efeito de suavização na malha de triângulos.....	61
Figura 5.7: Análise do aumento da resolução da superfície.....	62
Figura 5.8: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial da esfera .....	64
Figura 5.9: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial do plano.....	65
Figura 5.10: Análise do efeito dos vários coeficientes de suavização na malha de triângulos da esfera.....	66
Figura 5.11: Análise do efeito dos vários coeficientes de suavização na malha de triângulos do plano .....	66

## Índice de Tabelas

Tabela 3-1: Especificações do <i>scanner</i> utilizado (JOMEGUI) .....	14
Tabela 3-2: Vantagens e desvantagens nas medições por e sem contacto (Ferreira 2007) .....	17
Tabela 4-1: Definições dos parâmetros de análise no CATIA .....	27
Tabela 4-2: Resumo do estudo realizado no modelo de formas irregulares.....	28
Tabela 4-3: Nomenclatura utilizada nos gráficos .....	28
Tabela 4-4: Características dos modelos estudados .....	29
Tabela 4-5: Dados da geração de superfícies do modelo sem filtro.....	29
Tabela 4-6: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados.....	31
Tabela 4-7: Resultados da geração de superfícies dos modelos não otimizados.....	34
Tabela 4-8: Evolução do número de triângulos durante o processo de optimização da malha .....	35
Tabela 4-9: Resultados da geração de superfícies do modelo com resolução 500.....	38
Tabela 4-10: Resultados da geração de superfícies do modelo com desvio médio limite = 1mm.....	39
Tabela 4-11: Resumo do estudo realizado no modelo esférico .....	41
Tabela 4-12: Resumo do estudo realizado no modelo plano.....	41
Tabela 4-13: Características dos modelos esféricos.....	42
Tabela 4-14: Características dos modelos planos.....	42
Tabela 4-15: Resultados da geração de superfícies da esfera e do plano sem utilização de filtro .....	43
Tabela 4-16: Resultados da geração de superfícies da esfera com reconhecimento automático .....	45
Tabela 4-17: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados da esfera e do plano .....	47
Tabela 4-18: Resultados da geração de superfícies dos modelos não otimizados da esfera e do plano.....	49
Tabela 4-19: Características dos modelos finais utilizados no CATIA.....	52
Tabela 5-1: Definições dos parâmetros de análise no SolidWorks.....	56
Tabela 5-2: Resumo do estudo realizado nas formas irregulares .....	57
Tabela 5-3: Resultados da geração de superfícies do modelo sem remoção de ruído .....	57
Tabela 5-4: Resultados da geração de superfícies do modelo não simplificado .....	59
Tabela 5-5: Resultados da geração de superfícies do modelo não suavizado.....	60
Tabela 5-5: Resultados da geração de superfícies do modelo com resolução 0 .....	62
Tabela 5-5: Resumo do estudo realizado nas formas regulares: esfera e plano .....	63
Tabela 5-8: Resultados da geração de superfícies da esfera e do plano sem remoção de ruído.....	64
Tabela 5-9: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados da esfera e do plano .....	65
Tabela 5-10: Características dos modelos finais utilizados no SolidWorks .....	68
Tabela 6-1: Características dos modelos digitais da mandíbula inspeccionados .....	70
Tabela 6-1: Características dos modelos digitais da esfera e do plano inspeccionados .....	71
Tabela 6-2: Resultados da inspeção realizada na mandíbula .....	72
Tabela 6-3: Resultados da inspeção realizada nas esferas .....	72
Tabela 6-4: Resultados da inspeção realizada nos planos .....	72

## Objectivos

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação teve como objectivo o desenvolvimento de uma metodologia capaz de gerar um modelo 3D virtual, através do método de engenharia inversa, que replique fielmente o modelo físico original recorrendo a duas aplicações de CAD 3D disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e bastante utilizadas actualmente em vários ramos do projecto industrial. Com a realização deste estudo também se pretendeu avaliar as potencialidades de ambos os softwares na reconstrução automática de geometrias complexas irregulares e geometrias regulares.

A estratégia de engenharia inversa utilizada neste trabalho é principalmente caracterizada pelo seu elevado grau de automatização e pelos processos simples de geração de superfícies. No entanto, as superfícies resultantes apenas serão uma aproximação da forma original do objecto e a sua modificação em aplicações de CAD 3D é quase impossível (Ye, Liu et al., 2007) .

De uma forma geral, pode-se dizer que o objectivo do trabalho consiste na exploração e estudo das ferramentas disponibilizadas por cada uma das aplicações CAD 3D utilizadas na reconstrução de superfícies, de maneira a perceber o seu modo de funcionamento e retirar o melhor proveito de cada parâmetro. Este conhecimento permite um aproveitamento eficaz das ferramentas de engenharia inversa e a obtenção de superfícies com o máximo de precisão e reproduzir o modelo físico original de forma adequada.

Para tal, a avaliação preliminar dos métodos utilizados em cada aplicação foi feita através de dados fornecidos pelo próprio software, enquanto a análise final dos desvios geométricos e dimensionais apresentados pelos modelos obtidos (virtuais) relativamente ao modelo original (físico) foi realizada numa máquina de medição por coordenadas.

A utilização destes processos é complexa e exigente mas é cada vez mais vasta a sua aplicação no desenvolvimento de produto, pelo que, deste modo torna-se importante estabelecer uma metodologia, que utilize esta tecnologia e permita gerar uma réplica fiel do modelo físico original. Com a realização deste trabalho tenta-se dar um contributo válido para um maior conhecimento das metodologias e tecnologias capazes de serem utilizadas na geração de modelos tridimensionais, estabelecendo um caminho prático e um processo de decisão que permite encurtar os tempos de processamento e melhorar os resultados finais.

## **Introdução**

Esta dissertação é composta por sete capítulos, cujos conteúdos de cada um podem ser descritos resumidamente por:

### **Capítulo I – Engenharia Inversa**

Neste capítulo é feito um enquadramento do processo de engenharia inversa, processo base do estudo realizado. Além da sua definição, explica-se em que medida a sua implementação é fundamental no processo de produção da indústria actual. Finalmente procedeu-se a um breve levantamento do estado da arte dos processos de aquisição de forma.

### **Capítulo II – Projecto Assistido por Computador**

No segundo capítulo expõe-se a importância do desenho assistido por computador e a crescente necessidade da sua evolução, além de ser feita uma descrição dos vários tipos de sistemas de CAD (*Computer Aided Design*) existentes. Ainda neste capítulo são analisadas as condicionantes inerentes ao projecto distribuído.

### **Capítulo III – Tecnologias de Suporte**

O Capítulo III centrou-se nas tecnologias de suporte ao trabalho realizado. Fez-se uma breve análise às tecnologias utilizadas: as ferramentas de modelação, de levantamento de forma e de controlo dimensional.

### **Capítulos IV e V – Estudo realizado com os softwares CATIA e SolidWorks, respectivamente**

Os Capítulos IV e V foram dedicados ao estudo experimental realizado nas duas aplicações de modelação utilizadas. Em ambos os casos foi seguido o mesmo método de apresentação. Inicialmente é feito um breve resumo do estudo realizado, acompanhado com uma explicação da metodologia adoptada. De seguida é dada uma explicação do modo de funcionamento dos comandos utilizados na realização do estudo e são definidos os parâmetros de análise. Os resultados são apresentados com o apoio de gráficos e uma breve análise dos mesmos. No final de cada capítulo podem ser lidas as conclusões de cada estudo.

### **Capítulo VI – Comparação dos modelos digitais obtidos com o modelo físico original**

No Capítulo VI foi feita a análise dos resultados obtidos nos dois capítulos anteriores e a consequente validação do estudo realizado em ambos os softwares. São apresentados três quadros de resumo com os resultados obtidos através da máquina de medição por coordenadas.

### **Capítulo VII – Conclusões gerais**

Apesar de serem apresentadas conclusões dos estudos realizados nos Capítulos IV, V e VI, neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais e os ensinamentos obtidos para o futuro.

# **1 ENGENHARIA INVERSA**

## **1.1 Introdução**

Actualmente, a crescente complexidade e diversidade de produtos leva as empresas a recorrerem à integração de novas técnicas e ferramentas no processo produtivo, com o intuito de acelerar o desenvolvimento de produto e assim responder às exigências de um mercado cada vez mais competitivo. Novos dispositivos e técnicas emergentes estão a elevar o limite da criatividade. O mercado de hoje é caracterizado por uma crescente necessidade de produzir mais rápido e obter produtos distintos e inovadores (Ye, Liu et al., 2007).

Para enfrentar estes novos desafios são necessárias metodologias avançadas de concepção e fabrico como forma de reduzir o tempo de geração de ideias e aquisição de conhecimento. A engenharia inversa é vista como um dos processos capazes de diminuir os prazos do ciclo de desenvolvimento de produto, sendo que é cada vez mais vasta a sua aplicação. Aliado a este facto tem-se assistido a um rápido crescimento das tecnologias inerentes a todo o processo.

## **1.2 O processo de Engenharia Inversa**

O processo convencional de engenharia parte de uma ideia ou de um conceito para a criação de um novo produto. Pelo contrário, o método de engenharia inversa consiste no estudo de uma solução existente para perceber e reproduzir os conceitos nela empregues.

Segundo Várady, Martin et al. (1997) no campo do Desenho Assistido por Computador (CAD), engenharia inversa pode ser definida como o processo de obtenção de um modelo CAD através da aquisição de forma de um modelo físico existente. O processo de engenharia inversa está dividido em quatro fases principais: aquisição de dados digitais e pré-processamento dos dados, segmentação, criação das superfícies e geração do modelo tridimensional.

A primeira fase diz respeito aos dados adquiridos através de digitalização e a algum tipo de processamento necessário, como por exemplo a remoção de ruído e eliminação dos pontos fora da zona de interesse da peça. A segmentação e criação das superfícies referem-se ao tratamento dos dados adquiridos para que a superfície reproduza a informação dada pelos pontos, que por sua vez leva à última fase do processo que consiste na obtenção do modelo CAD (Stamti e Ioannis, 2007). Os métodos mais comuns para a aquisição de pontos são a utilização de uma sonda de contacto montada numa máquina CMM ou num braço articulado, ou um *scanner* laser 3D. Ambos os processos permitem a obtenção de uma nuvem de pontos correspondente à superfície do objecto.

Resumidamente, o método de engenharia inversa resulta na criação de um modelo CAD a partir de um objecto físico. É um processo complexo e exigente mas essencial em muitas indústrias uma vez que os modelos CAD adquiridos ajudam a melhorar a qualidade e a eficiência de novos produtos além de tornar mais rápido o ciclo de desenvolvimento de um novo produto. A Figura 1.1 mostra a integração do processo da engenharia inversa no processo produtivo.

Um exemplo que traduz a importância do processo de engenharia inversa, é o facto de em algumas situações os designers não trabalharem no modelo CAD necessário para materialização das suas ideias e recorrerem a métodos mais sensíveis, esculpindo em barro ou madeira. As formas cada vez mais complexas, exigem que a modelação directa em CAD seja uma tarefa muito complexa e difícil de garantir que a representação virtual seja uma réplica exacta do modelo esculpido. A engenharia inversa oferece uma solução a este problema uma vez que o modelo físico é a fonte de informação para o modelo CAD.

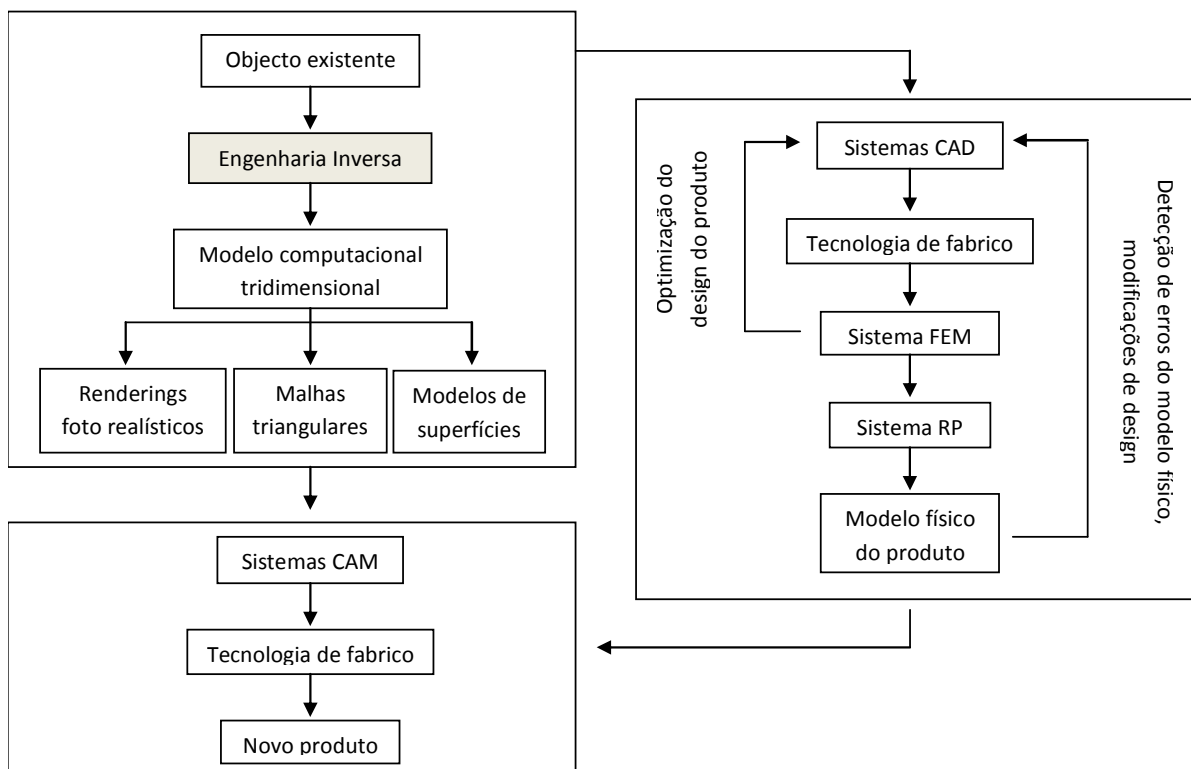


Figura 1.1: Integração da engenharia inversa no processo produtivo (Alves 2004)



### 1.3 A utilização da Engenharia Inversa

A engenharia inversa é utilizada pelos mais variados motivos, tornando-se de uma forma ou outra, a melhor solução para resolver determinados problemas. Como referido por Raja e Fernandes (2008), a engenharia inversa também é utilizada:

- Quando o fabricante original de um produto já não o fabrica ou pura e simplesmente já não existe e o cliente necessita desse produto.
- Quando a documentação original do desenho de um produto foi perdida ou nunca existiu.
- No controlo de qualidade ou inspecção é utilizada para comparar um produto com a sua descrição CAD.
- Para providenciar uma análise e avaliação eficazes de um produto quando alguma parte deste necessita ser substituída, ou quando se pretende analisar as qualidades e defeitos de produtos concorrentes.
- Na geração de modelos digitais para a sua utilização em animações ou filmes.
- Na adaptação de calçado e roupa para determinadas pessoas e ainda na determinação da antropometria da população.
- Na área da medicina, na criação de produtos que se adaptam perfeitamente ao cliente, como aparelhos de audição ou material de ortodontia.
- Preservação e reconstrução de monumentos históricos.

### 1.4 Processos de aquisição de forma

A aquisição da geometria de um objecto físico é um passo fundamental no processo de engenharia inversa, que tem como finalidade obter a informação digital necessária para gerar a réplica desse objecto. Não é possível atingir um resultado final satisfatório se o levantamento de forma não for realizado com uma estratégia adequada ao objecto em causa.

Ao longo dos últimos anos, tem-se assistido ao desenvolvimento de vários métodos para levantamento de forma tridimensional (3D). Estes métodos podem ser passivos ou activos, como se pode verificar na Figura 1.2. As técnicas passivas utilizam a luz ambiente para obter informação acerca da superfície enquanto as técnicas activas caracterizam-se por projectar um feixe de luz ou energia para a superfície da peça adquirindo a informação necessária através do seu reflexo (Tavares e Coelho, 2003).

Existem dois tipos de tecnologia: aquisição de pontos com contacto e sem contacto físico. A continuidade como é feita a digitalização define a técnica - ponto a ponto ou varrimento. Ponto a ponto significa que os pontos são adquiridos de forma discreta. Varrimento significa que a aquisição é realizada de uma forma contínua ao longo de uma linha ou trajectória.

Nas medições com contacto ponto a ponto o sistema conhece a coordenada do centro da esfera (apalpador) quando esta se encontra na sua posição de referência, e por cada vez que abandona essa posição é registada a coordenada de um ponto. O princípio de funcionamento das medições com contacto por varrimento é em tudo semelhante, apenas difere na posição de referência que não é fixa. Nas medições sem contacto o princípio de funcionamento é designado por triangulação óptica, onde um feixe laser incide sobre as superfícies da peça e o ângulo da reflexão é medido por um sensor óptico. Nas medições sem contacto ponto a ponto, o software de medição regista as coordenadas dos pontos com base na posição de referência da sonda e na análise da reflexão. O princípio de funcionamento da técnica de medição óptica por varrimento é idêntica à medição óptica ponto a ponto, com a capacidade de medir pontos ao longo de uma secção da peça apenas com um posicionamento, isto é, na mesma posição de referência é possível registar os pontos que definem um perfil (RNPR, 2008).

Os erros nas medições com contacto estão relacionados com o grau de incerteza da máquina e com trajectórias de varrimento inadequadas, isto é, que provoquem direcções de aproximação inapropriadas. Em relação aos sistemas sem contacto, os erros de medição estão relacionados com o grau de incerteza dos movimentos da máquina e com medições efectuadas fora dos limites das capacidades da sonda, isto é, numa posição relativa à peça que não respeite os valores de distância e amplitude declarados pelo fabricante (RNPR, 2008).

Ambas as técnicas de levantamento de forma apresentam algumas limitações. Os *scanners* que recorrem ao contacto são bastante limitados no que diz respeito ao tipo de material uma vez que para registar um ponto o apalpador sujeita o material a uma determinada pressão, impossibilitando uma digitalização precisa de materiais macios como a borracha. Além disso, dependendo do tamanho e forma do objecto, a aquisição da sua geometria também se pode tornar numa tarefa demorada. Por outro lado, apesar de ser possível adquirir uma quantidade significativa de informação com *scanners* sem contacto, em relativamente pouco tempo, esta tecnologia também apresenta uma série de limitações. Quando a luz emitida pelo laser incide em superfícies brilhantes torna-se necessário recorrer à pintura da superfície da peça para evitar a dispersão do feixe do *scanner*. Este problema também se põe na ausência de reflexos, como em peças transparentes. Além disso, têm alguma dificuldade em adquirir geometrias paralelas à direcção do eixo do laser. Estes problemas limitam a utilização de *scanners* sem contacto a áreas da engenharia onde a velocidade de aquisição de dados tem um peso superior à precisão dos mesmos. A tolerância típica dos *scanners* de contacto varia entre os 0.01 e os 0.02 mm enquanto nos *scanners* sem contacto varia entre 0.025 e 0.2 mm (Raja e Fernandes, 2008).

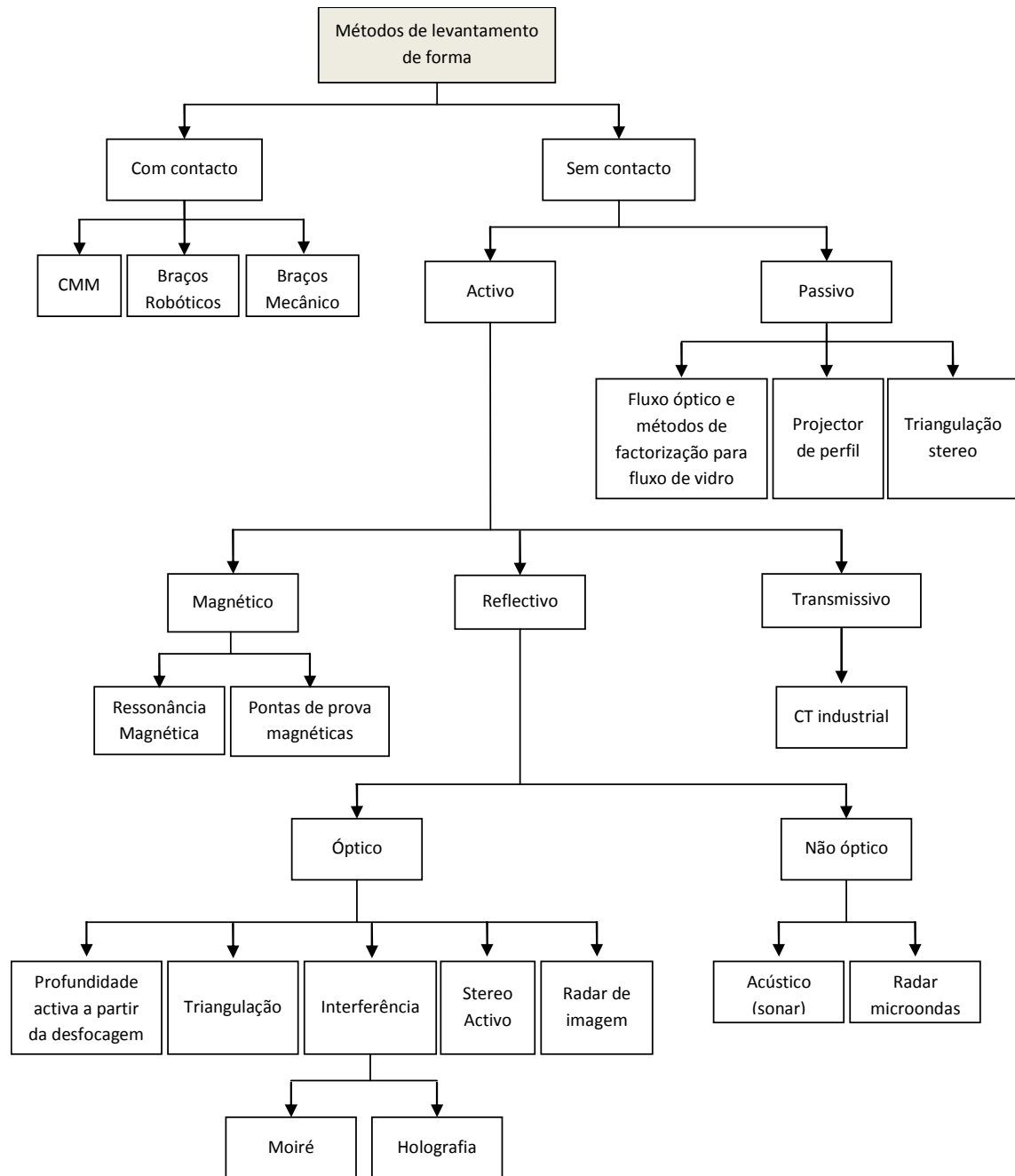


Figura 1.2: Diagrama explicativo dos vários métodos de levantamento de forma (adaptado de Vukasinovic, Kolsek et al., 2007)

## **2 PROJECTO ASSISTIDO POR COMPUTADOR**

### **2.1 Desenho Assistido por Computador (CAD)**

É inegável o impacto dos sistemas de CAD (*Computer Aided Design*) e os benefícios que estes trouxeram a toda a dinâmica da indústria, tornando-a naquilo que é hoje. O projecto assistido por computador revolucionou por completo o trabalho de engenheiros e designers assumindo-se como uma das suas principais ferramentas. Este desenvolvimento levou a que os departamentos de desenvolvimento de produto em todo o mundo sofressem uma profunda alteração na sua organização e em todo o processo de concepção.

Um engenheiro utiliza os sistemas de CAD para criar, visualizar e testar o seu projecto, sendo que as modificações podem ser feitas até atingir os objectivos propostos. Vantagens na sua utilização não faltam, desde o aumento de produtividade à minimização dos erros de concepção, redução do tempo de desenvolvimento, aumento da qualidade de concepção e reutilização de projectos já existentes (Siodmok, 2008). Todos estes factores tiveram enorme preponderância na implementação dos sistemas CAD nos mais variados ramos da engenharia, do design e da arquitectura, só para citar os mais habituais.

A pressão de colocar no mercado produtos o mais rapidamente possível, conjuntamente com os avanços e redução de custo das tecnologias de prototipagem rápida criaram um acentuado crescimento das tecnologias inerentes ao desenho assistido por computador. Pode-se constatar que quase todos os produtos que vemos em casa ou no trabalho, em alguma parte do seu processo de desenvolvimento, foram modelados e analisados num software de CAD (Siodmok, 2008). Combinado com efeitos visuais foto-realísticos e animações, o ficheiro CAD é a ponte entre a imagem de um produto e a sua realidade, ou seja, é possível através de efeitos visuais prever o aspecto final de um produto concebido numa ferramenta de CAD.

Foi a possibilidade de transformação de um ficheiro de CAD num modelo físico que constituiu o progresso mais notável e afectou por completo a velocidade de projecto e desenvolvimento do

produto (Siodmok, 2008). Estes avanços permitiram que num curto espaço de tempo se possa criar um protótipo simples para avaliar a forma de um modelo e reutilizar o sistema de CAD para fazer a sua actualização geométrica e criar novamente um protótipo para verificar as diferenças alcançadas. Esta tecnologia pode ser usada para prevenir falhas nas fases iniciais do desenvolvimento do produto de maneira a reduzir significativamente custos de eventuais erros em fases mais avançadas do projecto.

Um dos aspectos chave na implementação dos sistemas de CAD na nossa sociedade e na indústria é a complexidade e o tempo dispendido em adquirir o conhecimento necessário para trabalhar com o software. Hoje, os sistemas mais avançados podem exigir quase um ano inteiro até uma boa apreensão ou ainda mais tempo para conhecimentos mais avançados. Os avanços feitos na interface com o utilizador devem permitir reduzir a complexidade e duração do processo de aprendizagem de modo a aumentar o seu potencial e reduzir as barreiras inerentes a essa mesma aprendizagem (Siodmok, 2008).

O uso dos sistemas de CAD 3D para auxiliar o desenvolvimento de novos produtos tem vindo a singrar dentro da maioria das empresas. O que ainda falta é o estabelecimento de metodologias que permitam tornar os modelos gerados mais flexíveis e reutilizáveis de modo eficiente. Com isto, seria possível implementar modificações nas peças de forma rápida e sem necessidade de remodelação. A geração de novas peças a partir de outras já existentes também seria beneficiada, resultando assim num aumento da produtividade dos projectistas e do processo de desenvolvimento do produto (Foggiato, Volpato et al., 2007).

A tecnologia de CAD quando correctamente aproveitada é um factor essencial na criação de novos produtos a preços mais reduzidos e num menor espaço de tempo, conduzindo a um melhor rendimento de todo o projecto.

### **2.1.1 Elementos de modelação: sólidos e superfícies**

Em termos gerais pode-se dizer que os softwares de CAD estão divididos em dois tipos de categoria no que diz respeito à modelação, a modelação por elementos sólidos e a modelação por elementos de superfície.

Os sistemas de superfícies são capazes de descrever formas complexas e são “geralmente usados para definir formas mais estéticas e aerodinâmicas” (Jacobs, 1990), sendo esta a sua principal virtude e motivo para que sejam bastante utilizados hoje em dia. No entanto, este tipo de modelação apresenta algumas limitações, nomeadamente no que se refere à manipulação de topologia. Outra limitação prende-se com a impossibilidade de realizar alguns cálculos de engenharia, como a determinação do volume, sendo também mais difícil a elaboração automática de desenhos técnicos dos objectos (Simões 2002).

De uma forma simplificada, pode-se dizer que modelação por superfícies consiste em definir o exterior de um sólido com uma camada infinitamente fina. A maioria dos sistemas de modelação por superfície utiliza curvas NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*) para descrever a

superfície de um objecto. O desenvolvimento destas curvas surgiu com a necessidade de caracterizar matematicamente e de uma forma bastante precisa a representação de superfícies de forma livre (*freeform*).

As curvas NURBS caracterizam-se por terem um determinado número de pontos de controlo (pólos) em que cada um destes tem um peso específico na manipulação da própria curva, permitindo assim flexibilidade para criar uma grande variedade de formas (Minetto, 2003). Os limites da superfície são definidos pelos pólos que se encontram nas extremidades, sendo que os intermédios funcionam como ímanes atraindo a superfície na sua direcção. As formas cada vez mais arrojadas no desenho de produto criaram problemas aos engenheiros, tornando a sua modelação praticamente impossível sem o recurso a curvas NURBS. Esta forma de modelar permite grande liberdade ao design, tornando assim possível a materialização das ideias baseadas em geometrias mais complexas.

Por sua vez, a modelação sólida é bastante mais limitada no que diz respeito à manipulação de formas complexas, no entanto, oferece grande fiabilidade quando existe a necessidade de fazer alterações ao nível da topologia. Este tipo de modelação pode ser definido como uma representação geométrica de um volume delimitado. O volume é representado graficamente, com curvas e superfícies, assim como por uma estrutura topológica em árvore que promove uma relação lógica inerente apenas aos elementos sólidos, que permite definir e manter todas as relações entre cada face e superfície da geometria. Um requisito dos sistemas CAD de modelação sólida é a criação de uma descrição inequívoca da geometria a ser modelada (Jacobs, 1990). O facto de o software armazenar a informação topológica do objecto permite que qualquer alteração feita na sua forma, localização ou alteração na ordem das funções, tenha repercussões automáticas em todo o objecto, característica paramétrica e varacional da modelação sólida. No entanto este factor topológico pode ser um grande obstáculo à criatividade nomeadamente na geração de objectos de geometria complexa ou de forma livre.

A modelação com base em elementos sólidos permite também obter determinadas características do objecto, como densidade ou volume, pelo facto de serem modelos virtuais sólidos (Simões, 2002). Outras das vantagens desta modelação consistem na forma como consegue combinar objectos sólidos através da sua intersecção, soma ou subtracção, para assim criar as formas desejadas (Hohler, 2000). Ao contrário da modelação por superfícies não existem interrupções entre as faces de um modelo sólido, constituindo também uma enorme vantagem na sua utilização em processo de fabricação directa como sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) ou Prototipagem Rápida.

Com a necessidade de recolher benefícios de ambas as partes, têm sido desenvolvidos modelos que conseguem ir buscar o melhor dos dois sistemas. Estes sistemas de modelação híbrida combinam a facilidade de realizar formas complexas dos modelos de superfícies com a semântica dos sistemas de modelação sólida (Lacourse e Redmond, 2004). Num verdadeiro sistema híbrido, as superfícies e as faces sólidas devem ser capazes de interagir entre si e ainda permitir constrangimentos e relações entre elas.

Além dos sistemas referidos anteriormente, nos últimos anos foram desenvolvidas ferramentas de modelação que permitem ao utilizador tocar e manipular objectos virtuais (Chen, Yang et al., 2005). Estes sistemas, bastante utilizados na área médica, são denominados *haptic* (relativo ao tacto) e interagem com o utilizador através da aplicação de forças e vibrações, permitindo sentir, tocar e deformar modelos virtuais num ambiente 3D. Outra aplicação que vale a pena fazer referência é o “Google SketchUP”. Utilizado sobretudo para criar facilmente modelos arquitectónicos em 3D, é muito limitado ao nível da engenharia mas útil em casos pontuais. O facto de ter sido comprado pelo Google mostra a importância dos sistemas CAD hoje em dia e o seu crescente nível de implementação e alargamento destes a crescentes faixas de utilizadores.

## 2.2 Projecto distribuído, geração e transferência de ficheiros

Como anteriormente referido, para se manterem competitivas, as empresas necessitam de lançar novos produtos em espaços de tempo cada vez menores. Nesse sentido passaram a procurar formas de reduzir o ciclo de desenvolvimento de produto.

Uma das soluções adoptadas pelas empresas, no início dos anos 80, foi o aumento do grau de simultaneidade das actividades de desenvolvimento. Actividades que eram realizadas de modo sequencial e após o término e aprovação de outras anteriores foram antecipadas para que o seu início não ficasse dependente de demorados ciclos de aprovação (Zancul e Rozenfel, 2003). O processo de engenharia tradicional tem vindo assim a evoluir de uma actividade linear segmentada para uma actividade em equipa, envolvendo áreas multidisciplinares de projecto. Esta forma de fazer projecto é hoje designada de *Engenharia Simultânea (Concurrent Engineering)* (Simões, 2002).

Nos dias que correm, existe uma consciência comum na indústria de que o trabalho em equipa é fundamental e os engenheiros vêem-se obrigados a comunicar e a trabalhar de uma forma muito mais dinâmica do que estavam habituados, uma vez que todas as tarefas estão bastante dependentes umas das outras. A alteração dos métodos de trabalho é constante e sempre no sentido da optimização de todos os processos de concepção e produção. Outro fenómeno que se tem observado nos últimos anos é uma cada vez maior globalização da indústria no sentido em que as equipas de trabalho estão espalhadas pelos vários cantos do mundo mas trabalhando como se fossem uma única equipa apontando esforços para um objectivo comum, este processo é designado por *Projecto Distribuído*. Os avanços na tecnologia, a necessidade crescente das empresas serem mais competitivas no mercado e a necessidade de desenvolver softwares mais complexos, são os principais motivos que levam a que as equipas de desenvolvimento estejam cada vez mais dispersas (Nidiffer e Dolan, 2005). Este facto leva a uma crescente necessidade de optimizar a transferência de dados a nível global com uma margem mínima de interpretação (Siodmok, 2008).

Os projectos distribuídos geograficamente permitem aos gestores de projecto comprimir horários empregando equipas de trabalho maiores do que aquelas que se fixam apenas num local, usando as diferenças horárias de cada zona para aumentar o número de horas produtivas num dia, e assegurar os escassos recursos de conhecimento que estão espalhados pelo mundo. Contudo,

estes benefícios têm riscos acrescidos devido à falta de contacto e comunicação directa com os vários intervenientes podendo levar a uma falta de confiança e de colaboração dentro da equipa de trabalho (Nidiffer e Dolan, 2005). Esta distribuição geográfica aumenta também a probabilidade dos diferentes membros de tais equipas serem originários de culturas diferentes, sendo que essas diferenças de comportamentos e expectativas, podem resultar num choque cultural, criando eventualmente problemas de desempenho e relacionamento (Evaristo, 2003).

Os recursos tecnológicos existentes hoje em dia não são suficientes para uma comunicação eficiente entre as diferentes partes envolvidas. Apesar de todos os dispositivos existentes, a evolução da gestão do projecto distribuído passa também por uma melhora constante ao nível dos processos, métodos e ferramentas de partilha de dados, para que a colaboração e comunicação entre a equipa de desenvolvimento de produto seja cada vez mais eficaz. Esta colaboração inclui, naturalmente, a partilha de ficheiros entre as diferentes partes envolvidas durante o projecto. Idealmente, as equipas envolvidas num projecto deveriam ser capazes de transferir ficheiros CAD entre si sem qualquer tipo de incompatibilidade. No entanto, não existe nenhum formato padrão, o que leva a que a compatibilidade entre os sistemas de CAD e interligação CAD/CAM seja uma das grandes preocupações na indústria de fabrico actual.

O grande problema reside no facto de as empresas de software de CAD usarem os formatos nativos dos seus programas para 'prenderem' os utilizadores ao seu software. Os sistemas de modelação paramétrica tornam impossível a manipulação de ficheiros nativos noutro tipo de software. Os utilizadores que pretendem fazer a interligação entre dois sistemas, apenas o podem fazer utilizando ficheiros normalizados. Estes ficheiros vêm sem a informação de como foram criados tornando impossível a sua manipulação a nível das características paramétricas (Menezes, 2006). Apenas fazem a conversão da geometria, com criação de curvas e superfícies fronteira em todas as características geométricas do objecto resultando assim num modelo sólido extremamente difícil de modificar (TranslationTech, 2008).

A possibilidade de existir compatibilidade entre os diferentes sistemas de CAD e CAD/CAM permitiria uma maior eficiência de todo o processo de desenvolvimento do produto. Um dos objectivos dos fabricantes é o aumento da eficiência na produção através da optimização do processo de desenho-fabrico, nomeadamente no controlo de ficheiros. A diversidade de equipamento e a heterogeneidade de software de CAD/CAM tem um papel importante na comunicação entre sistemas. Esta dificuldade pode existir, não só numa empresa que tem mais do que um sistema, mas também numa empresa com diversos parceiros que utilizem sistemas diferentes. A falta de interligação entre sistemas de CAD ameaça seriamente a qualidade final do produto, pois conduz a um desnecessário acréscimo de custos e a um aumento do tempo necessário para colocação do produto no mercado.



### **3 METODOLOGIA E TECNOLOGIAS DE SUPORTE**

#### **3.1 Materiais e Métodos**

Este trabalho teve como objectivo desenvolver uma metodologia de reconstrução de superfícies através do processo de engenharia inversa. Para tal, foi necessário recorrer à utilização de várias tecnologias durante as diferentes etapas deste estudo. Inicialmente foi feito o levantamento da forma do objecto de estudo através de um *scanner* laser 3D, de seguida foram gerados os modelos digitais recorrendo a dois softwares distintos e finalmente foi feita a análise comparativa por controlo dimensional dos mesmos numa máquina de medição por coordenadas.

O estudo realizado abrangeu a reconstrução de superfícies de diferentes geometrias: irregulares e regulares. Cada geometria foi estudada individualmente. Devido à sua forma anatómica, o objecto escolhido para o estudo de geometrias complexas livres foi uma réplica de uma mandíbula humana (sawbones<sup>®</sup>), enquanto no estudo de geometrias regulares foram utilizadas duas bolas de pingue-pongue para representar geometrias esféricas e um paralelepípedo de poliuretano rígido de alta densidade para representar a geometria plana. As bolas de pingue-pongue e o paralelepípedo também foram utilizados como dispositivos de fixação, ou seja, serviram de suporte à mandíbula e ajudaram à sua colocação numa posição favorável ao levantamento de forma. Além disso, foi utilizada uma pequena esfera rectificada que apenas serviu de suporte à parte frontal da mandíbula e não foi alvo de qualquer estudo. No processo de aquisição de pontos da mandíbula apenas foi feita a digitalização da sua parte exterior, por se considerar suficiente para realizar o estudo sobre as geometrias complexas.

#### **3.2 Tecnologias de levantamento de forma**

Na realização do levantamento de forma do objecto de estudo recorreu-se a uma digitalização activa sem contacto através de um *Scanner* 3D de varrimento por laser (Roland LPX 250). O levantamento de forma foi efectuado automaticamente pela aplicação informática do equipamento utilizado (Dr. Picza 3 da Roland DG Incorporation). Esta tecnologia permite criar um

modelo de um objecto 3D muito rapidamente e é amplamente utilizada em diversas áreas que recorram a processos de engenharia inversa ou prototipagem.

Duas características básicas dos *scanners* 3D são a resolução e a precisão. Uma boa precisão indica-nos se a coordenada de um ponto medido se aproxima da coordenada real desse ponto. A resolução é a distância mais pequena entre dois pontos que o *scanner* consegue obter, e pode ser controlada no software para tornar a aquisição mais célere (Vinagre, 2008).

O *scanner* utilizado (Figura 3.1) disponibiliza duas estratégias de varrimento: uma rotacional e outra planar. Estas opções oferecem uma grande versatilidade pois permite trabalhar com uma enorme variedade de formas. No modo rotacional, o feixe laser desloca-se verticalmente e faz um varrimento do objecto inteiro. Este modo é ideal para leituras rápidas da geometria do objecto, para objectos de revolução ou de transições suaves e sem reentrâncias acentuadas. No varrimento planar a aquisição é feita através da obtenção de pontos segundo diferentes planos permitindo observar cortes laterais e cavidades. Este modo é ideal para a obtenção de pormenores em peças de geometria complexa e ideal para objectos relativamente planos ou outros que tenham faces com ângulos que seriam indetectáveis no método rotacional. O LPX-250 pode adquirir um máximo de seis planos (Vinagre, 2008). As especificações deste equipamento são apresentadas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Especificações do *scanner* utilizado (JOMEGUI)

<b>Especificações</b>	
Área de trabalho	254 mm (diâmetro) - 406,4mm (altura)
Peso máximo na mesa	5 Kg
Resolução	0.2 mm
Velocidade	15 rpm - Rotação do Prato
Passo de Varrimento	50 mm/s
Formatos exportados	DXF, VRML, STL, IGES
Método de <i>Scan</i>	Laser óptico - Triangulação Spot Beam
Laser	Frequência da onda:- 600 a 700 nm - 2857 hz.
Peso do equipamento	32 kg
Consumo de energia	0,39 Watts
Interface com o computador	Serial (RS 232)
Temperatura de Operação	5 a 40 °C



Figura 3.1: Scanner Roland LPX-250

O modo rotacional foi o método utilizado para a digitalização do objecto de estudo (Figura 3.2) uma vez que apenas com uma leitura se conseguiu captar todas as superfícies pretendidas. A resolução da digitalização, tanto no varrimento circular como em altura, foi de 1mm. Como se pode verificar na Figura 3.2, a parte interior do modelo foi preenchida com espuma para aproximar o modelo a uma forma de revolução e assim evitar as reentrâncias e oclusões existentes na cavidade da mandíbula. Também permitiu delimitar de uma forma mais precisa o modelo, uma vez que no espaço entre a espuma e a mandíbula não foram digitalizados quaisquer pontos e assim a fronteira do modelo digital tornou-se mais perceptível.

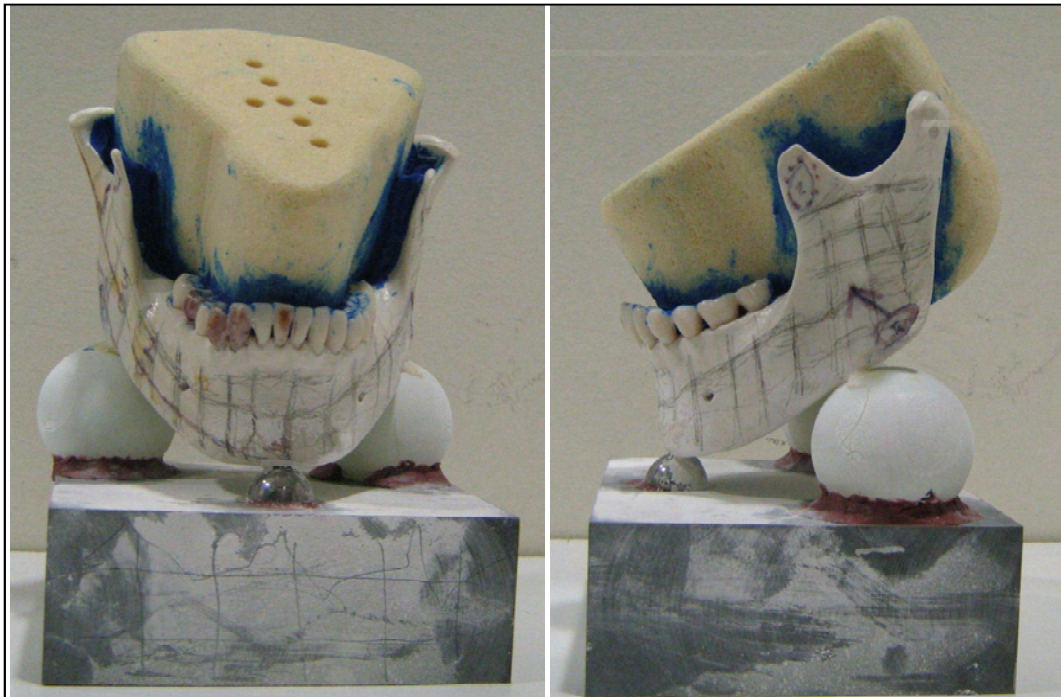


Figura 3.2: Objecto de estudo

### 3.3 Ferramentas de modelação 3D

A modelação 3D é o processo de desenvolvimento de um modelo digital 3D através de um software destinado a esse efeito. No caso deste trabalho a ferramenta CAD 3D foi utilizada para a geração de superfícies tendo por base uma nuvem de pontos previamente adquirida através de um *scanner* 3D. Os softwares utilizados foram o CATIA V5R19 e o SolidWorks 2009, ambos da Dassault Systèmes.

Existem vários softwares inteiramente dedicados ao processo de engenharia inversa, no entanto compatíveis com os restantes programas de CAD no que diz respeito ao tipo de ficheiros gerados. Em alternativa existem outros softwares que contêm, ou permitem adicionar, componentes específicos para a realização das mesmas tarefas, como é o caso das aplicações utilizadas neste trabalho (CATIA V5R19 e SolidWorks 2009). As ferramentas das aplicações de engenharia inversa têm como objectivo converter uma nuvem de pontos num modelo digital com o máximo de precisão. De uma forma geral, pode-se dizer que estas ferramentas estão divididas em dois módulos: um que transforma a nuvem de pontos numa malha de triângulos e outro que cria uma superfície a partir da malha de triângulos.

O software CATIA é uma potente ferramenta de trabalho, vastamente utilizado no projecto assistido por computador, que contém um pacote integrado de módulos que inclui todos os aspectos de concepção de produtos, como o CAD, o CAE (*Computer Aided Engineering*) e o CAM. Na realização do trabalho foram utilizados os módulos *Digitized Shape Editor* e o *Quick Surface Reconstruction*, que oferecem um número abrangente de soluções para a geração de superfícies, dependendo do tipo de forma que se pretende tratar. É possível fazer a identificação de formas regulares, adaptação de superfícies a formas livres ou criação de superfícies com linhas e pontos auxiliares. O *Quick Surface Reconstruction* contém também ferramentas próprias para a análise da qualidade de acomodação da superfície gerada à malha de triângulos.

O SolidWorks contém um *add-in* denominado *ScanTo3D*, que tal como o nome indica, permite obter um modelo tridimensional a partir de dados obtidos através de um *scanner* 3D. No que diz respeito à variedade de ferramentas, é notoriamente um software mais limitado que o CATIA. O *ScanTo3D* sugere ao utilizador a sequência dos passos que devem ser cumpridos na geração de superfícies e o utilizador apenas se limita a utilizar as opções sugeridas ou avançar para o passo seguinte. Também é possível fazer uma análise da qualidade da superfície com ferramentas próprias deste módulo.

Além do CATIA e SolidWorks existem muitos outros softwares passíveis de serem utilizados em aplicações de engenharia inversa. Entre os mais utilizados pode-se encontrar: o CopyCAD da Delcam, o Alias da Autodesk, o RapidForm 3D da INUS Technology, o Paraform ou o Geomagic Studio. (Bradley e Currie 2005).

### 3.4 Tecnologia de controlo dimensional

Partindo do princípio que sem comprovação metrológica não existe fiabilidade no processo e no fabrico de um produto, a metrologia tem procurado desenvolver a sua actividade na concepção de meios de medição adequados às grandezas a controlar. Num contexto, em que aumentam os meios de controlo dimensional, surge aquele que maior potencial apresenta no que diz respeito a este tipo de controlo: as máquinas de medição por coordenadas (CMM's), vulgarmente conhecidas como máquinas CMM e que basicamente são equipamentos que medem as características dimensionais e geométricas de qualquer tipo de peças (Ferreira, 2007).

A tecnologia de controlo dimensional e as tecnologias de levantamento de forma apresentam bases tecnológicas comuns, estabelecidas em processos de aquisição de coordenadas 3D. Neste trabalho recorreu-se à utilização de uma máquina CMM que realiza medições por contacto. A aquisição de coordenadas 3D pode ser efectuada por dois métodos diferentes: o primeiro envolve contacto e é conhecido por apalpação mecânica enquanto o outro permite a aquisição de coordenadas sem contacto com recurso à apalpação por laser (Vinagre, 2008). A Tabela 3-2 mostra, resumidamente, quais são as vantagens e desvantagens da utilização de cada um dos sistemas.

Tabela 3-2: Vantagens e desvantagens nas medições por e sem contacto (Ferreira 2007)

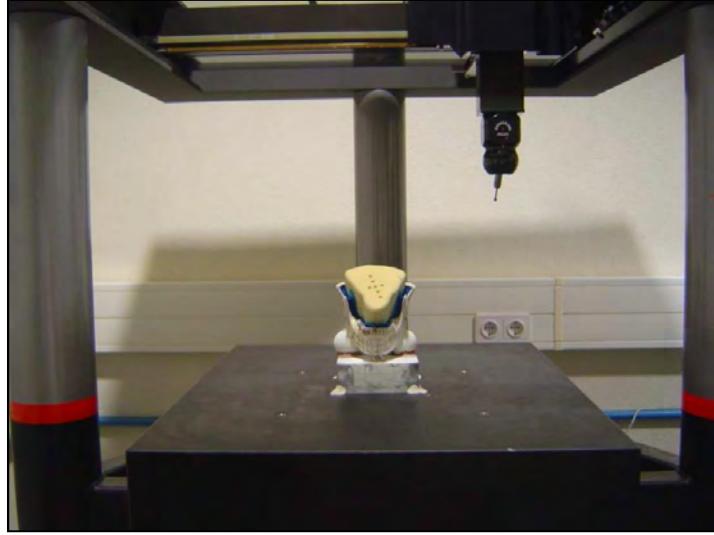
	Vantagens	Desvantagens
<b>Sistemas de contacto</b>	<p>Incertezas de medição baixas</p> <p>Muito boa versatilidade</p>	<p>A deformação que pode provocar na peça a medir, no momento do contacto</p> <p>A impossibilidade de efectuar medições em superfícies reduzidas e de difícil acesso</p>
<b>Sistemas sem contacto</b>	<p>Total ausência de contacto com a superfície a medir</p> <p>Não provoca deformação das peças ao medir</p> <p>Boa riqueza de detalhes, o que permite efectuar medições de cotas com dimensões muito reduzidas onde o contacto é muitas vezes impossível</p>	<p>Incertezas de medição ainda altas, quando comparadas com os sistemas de medição por contacto</p> <p>Possibilidade de existir distorções provocadas pela lente.</p>

O mais usual é comparar um modelo digital com vários modelos físicos, no entanto, neste trabalho foram comparados vários modelos digitais com um único modelo físico. A metodologia adoptada na inspecção dos modelos pode ser consultada no Capítulo VI, no entanto durante qualquer inspecção realizada numa CMM é necessário ter em conta alguns aspectos para um correcto desenrolar de todo o processo. Depois da preparação da máquina, é fundamental fixar a peça uma vez que qualquer deslocação da peça pode alterar o referencial e dar origem a erros. Uma vez fixada a peça deve-se proceder à escolha do tipo e diâmetro do apalpador e fazer a

respectiva calibração. Depois deste procedimento pode-se proceder à programação das medições desejadas. Finalmente é gerado um relatório que apresenta os resultados dos desvios obtidos. As especificações da CMM utilizada neste trabalho (Figura 3.3a) são apresentadas na Figura 3.4. Na Figura 3.3b mostra-se a disposição do objecto de estudo na CMM.



a)



b)

Figura 3.3: Medição por coordenadas: a) CMM utilizada neste trabalho e b) Disposição do objecto de estudo na CMM

Specification					
<b>Volumetric Measuring Accuracy</b>			<b>Bearings</b>		
	B89	0.010/300mm		Air Bearings on all axes	
	VDI (U3)	0.004 + 0.004L/1000mm	<b>Z-axis</b>	Counterbalanced	
<b>Measuring Volume</b>			<b>Max. balance weight</b>		
	X 500mm			1Kg	
	Y 600mm		<b>Air consumption</b>	20 l/min (1.0 cfm) @ 4 bar	
	Z 400mm		<b>Air Supply</b>	4 bar (55psi)	
<b>Measuring System</b>			<b>Software</b>		
	Renishaw Scale and Readhead			Full graphical interface, designed for Windows	
<b>Resolution</b>			<b>Probe System</b>		
	0.0005 standard or 0.0001mm			Full choice of Renishaw probes and probe heads	
<b>Maximum velocity vector</b>					
	1500mm/sec				
<b>Maximum acceleration vector</b>					
	5000mm/sec				
Specification subject to change without notice					

Figura 3.4: Especificações da CMM (Aberlink)

## **4 ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE CATIA**

### **4.1 Estudo realizado**

O modelo escolhido para a realização deste estudo contém formas irregulares e regulares. Com o intuito de realizar uma análise personalizada, as diferentes formas foram isoladas resultando em três modelos de análise: a mandíbula (formas irregulares), uma esfera e um prisma plano (formas regulares). À exceção da geração da superfície, foram utilizados os mesmos métodos para o tratamento da nuvem de pontos e da malha de triângulos.

No que diz respeito às formas esféricas, o estudo foi realizado na esfera de maiores dimensões uma vez que o levantamento de forma permitiu obter uma nuvem de pontos com um formato mais definido do que na esfera pequena. No estudo das formas planas foi escolhido o plano frontal do paralelepípedo apesar de os restantes planos apresentarem nuvens de pontos muito idênticas.

#### **4.1.1 Apresentação de resultados**

Os resultados obtidos são apresentados num gráfico do tipo *radar* e sempre de forma percentual. Em cada estudo foi feita uma análise relativa do comando utilizado que pretende mostrar o seu efeito em relação à não utilização do mesmo ou a uma instrução por defeito. No final de cada estudo os resultados observados nos gráficos são comentados e de seguida foi feita a sua análise.

#### **4.1.2 Metodologia**

Depois da aquisição de pontos do modelo pretendido através de um *scanner* laser 3D, foram removidos alguns pontos (*outliers*) manualmente enquanto o restante ruído e os pontos redundantes foram removidos com a aplicação dos dois tipos de filtro que o CATIA permite utilizar: homogêneo e adaptativo. Em ambos os estudos, formas regulares e irregulares, foram retiradas diferentes percentagens de pontos, de 10 a 50%, e foram escolhidos três modelos para

realizar os estudos que se seguiram: um modelo sem filtro, um com filtro adaptativo e um com filtro homogéneo. Depois de criar as malhas de triângulos de cada modelo, estas foram sujeitas a vários tipos de suavização e de seguida procedeu-se à sua optimização. Estes dois processos, em conjunto com a utilização dos filtros, permitem obter uma malha com melhor qualidade.

Tal como foi referido anteriormente, na geração da superfície foram utilizados métodos completamente diferentes nos dois estudos. No modelo de formas irregulares a superfície adapta-se automaticamente à malha existente e procedeu-se à variação de alguns dos parâmetros permitidos na geração da mesma. Nas formas regulares, esférica e plana, a superfície é gerada através do reconhecimento da forma da malha de triângulos e apenas se alterou o tipo de reconhecimento.

No diagrama seguinte pode-se observar o procedimento adoptado, que está dividido em três fases:

**1º fase:** manipulação e tratamento da nuvem de pontos

**2º fase:** criação e tratamento da malha de triângulos

**3º fase:** geração da superfície

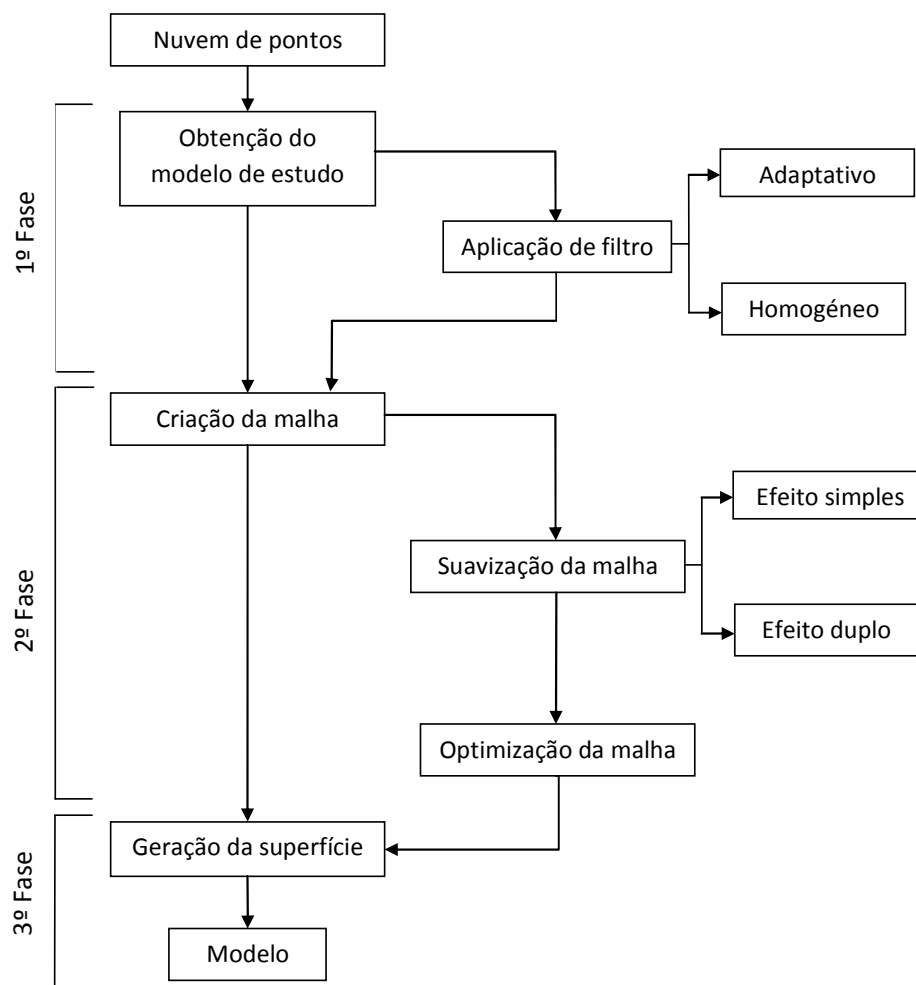


Figura 4.1: Procedimento para a geração de superfícies no CATIA



As Figuras 4.2 e 4.3 mostram de uma forma detalhada o método adoptado durante as três fases do processo de geração de superfícies de formas irregulares.

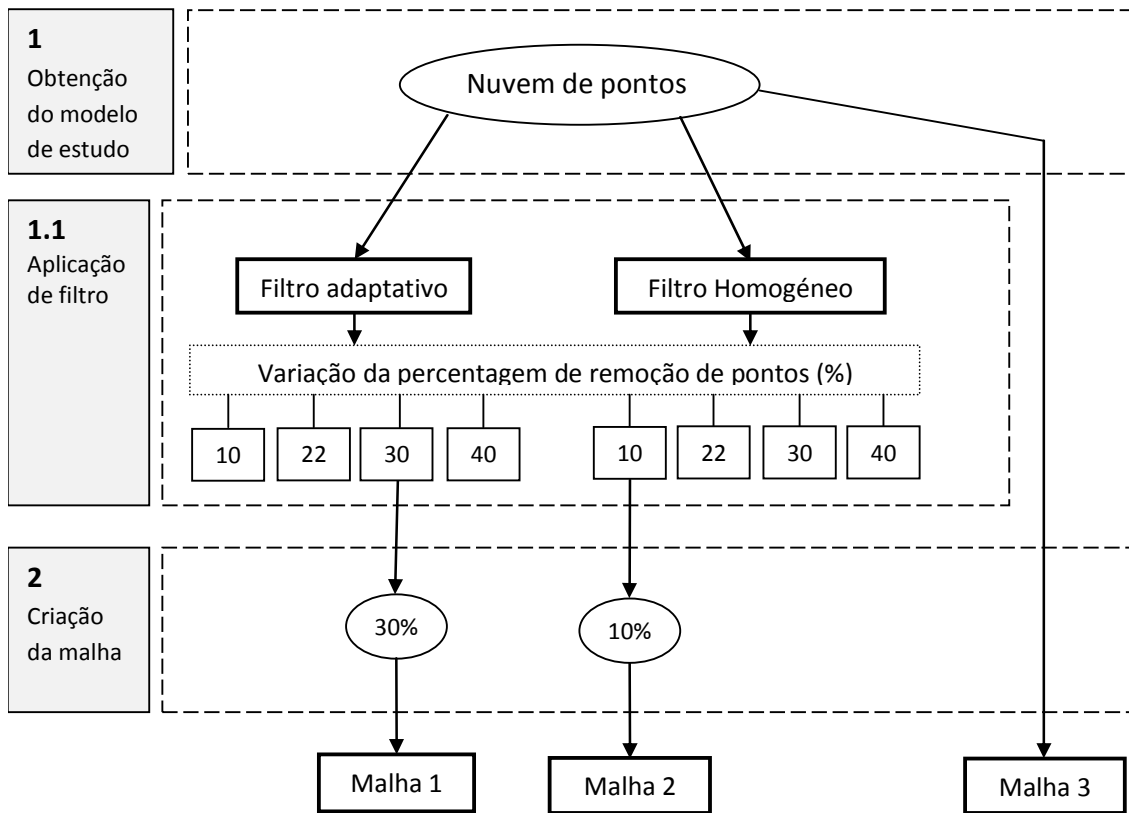


Figura 4.2: Primeira e segunda fase da geração de superfícies

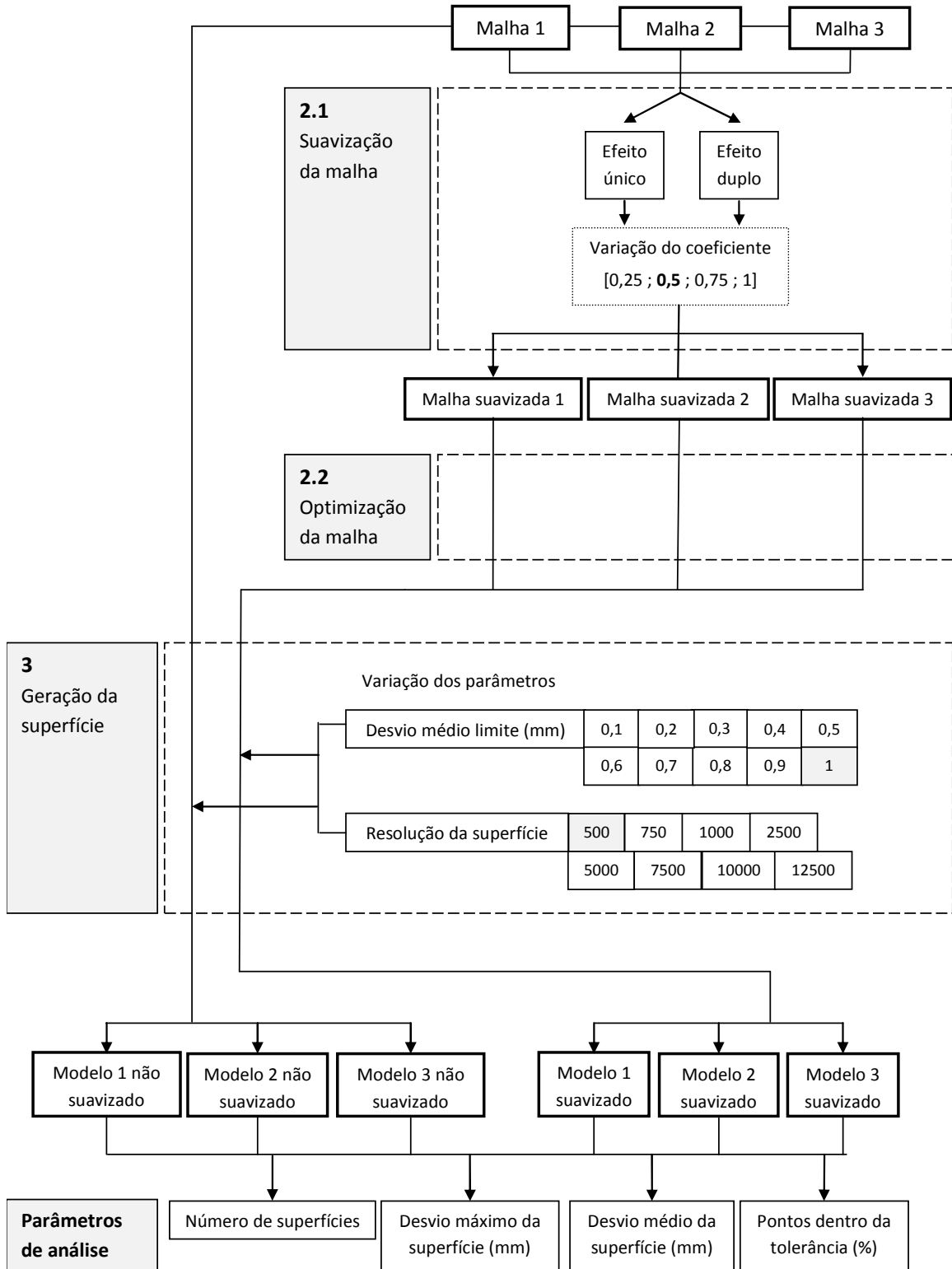


Figura 4.3: Segunda e terceira fase da geração de superfícies

## 4.2 Definição dos comandos utilizados

Durante as três fases do processo apenas foram utilizados alguns dos comandos disponíveis no software CATIA para a manipulação e tratamento de nuvens de pontos, criação e manipulação de malhas de triângulos e geração de superfícies. A função e o efeito de cada um dos comandos utilizados é exposto de seguida.

### 4.2.1 Tratamento da nuvem de pontos

Os dados adquiridos através do *scanner* laser 3D contêm bastante ruído e redundância, o que pode resultar na obtenção de nuvens de pontos de difícil manipulação. Por forma a facilitar esta manipulação e posterior processamento, a nuvem de pontos pode ser sujeita a vários tipos de tratamento sendo que a forma do objecto digitalizado deve permanecer sempre intacta.

Inicialmente foi necessário remover os pontos que se encontravam fora da zona de estudo e posteriormente o restante existente foi removido com a utilização de filtros. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de filtro, homogéneo e adaptativo. O filtro homogéneo reduz o número de pontos uniformemente. É criado um círculo à volta de um ponto e todos os outros pontos que estão dentro desse círculo são eliminados, como ilustra a Figura 4.2.

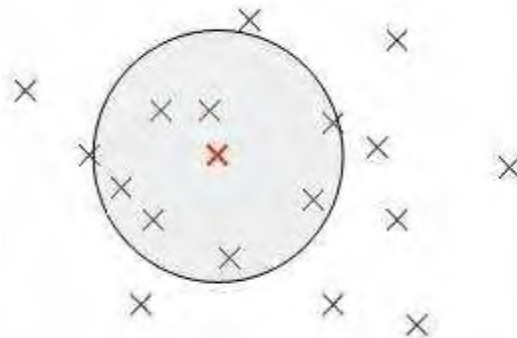


Figura 4.4: Critério para a remoção de pontos na utilização do filtro homogéneo (Hnátík, 2007)

O filtro adaptativo actua de forma mais acentuada em áreas planas mantendo bastantes pontos em superfícies mais complexas de maneira a realçar as áreas com maior curvatura (Tutorial-CATIA). O filtro adaptativo reduz os pontos de acordo com nível de curvatura baseado no erro cordal (Soni, Chen et al., 2008), que mede a distância máxima entre o arco do elemento gerado e a geometria real (Figura 4.3).

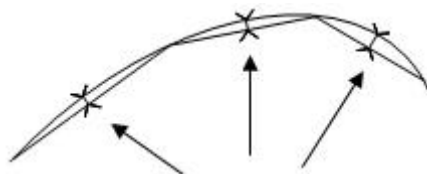


Figura 4.5: Ilustração da medição do erro cordal (Soni, Chen et al., 2008)

#### 4.2.2 Criação e tratamento da malha de triângulos

A criação da malha de triângulos através da nuvem de pontos obedece a um determinado valor de *vizinhança*. Este valor representa o comprimento máximo da aresta dos triângulos representados, ou seja, a distância máxima entre dois pontos para que estes possam formar a aresta de um triângulo.

Nos casos em que foi utilizado o filtro adaptativo, uma vez que este remove mais pontos das áreas planas, foi necessário aumentar o valor da *vizinhança* para obter uma malha sem espaços vazios no seu interior. Nos modelos com filtro homogêneo o valor da *vizinhança* utilizado foi o proposto, por defeito, pelo software e de acordo com o modelo em questão. Para uma melhor visualização da malha, foi utilizada a opção *shading* para simular a superfície do objecto, em detrimento da opção *triangles* que apenas representa as linhas de contorno dos triângulos. Também foi utilizada a opção *smooth* em que a luz é suavizada ao longo dos triângulos dando uma imagem da superfície com melhor qualidade, em vez da opção *flat* que envia a luz pela normal de cada triângulo realçando a sua forma.

##### Suavização da malha:

Na geração da malha, a existência de ruído na nuvem de pontos, causa normalmente o efeito *casca de laranja*. Este efeito transmite um aspecto granular (Figura 4.4a) à malha de triângulos e pode ser minimizado através da sua suavização (Figura 4.4b) e posterior optimização.

A suavização é um processo muito útil uma vez que modifica a organização dos triângulos de maneira a que estes se ajustem às curvas da malha. Ou seja, é uma técnica que ajusta as coordenadas de cada vértice sem alterar a topologia da malha mantendo o número de vértices e triângulos igual, permitindo assim manter a forma da malha intacta e melhorando a sua qualidade final (Zorin, 2002). O objectivo é minimizar o efeito do ruído e preservar o máximo de detalhes possível, de forma a construir um modelo mais preciso.

Foram utilizados dois tipos de suavização, de simples e duplo efeito. A suavização de efeito simples elimina os raios pequenos e é utilizada quando não existem elementos pontiagudos (*sharp edges*) na malha. O efeito duplo reduz a eliminação desses raios e reduz ainda a distância entre os vértices mais afastados da malha. Os dois tipos de suavização são afectados por um coeficiente que equilibra o efeito da nova posição dos vértices em relação à posição inicial. Este coeficiente pode ser entendido como a intensidade da suavização e varia entre 0 e 1, onde o vértice não é movido ou pelo contrário sofre a mudança de posição mais intensa (Tutorial-CATIA). Se o efeito da suavização for muito forte, não só se eliminam os elementos pontiagudos, como existe a possibilidade de se perder pormenores e detalhes importantes da geometria. Na realização do estudo das malhas suavizadas foram utilizados oito tipos de suavização: efeito duplo e efeito simples com coeficiente 0.25, 0.5, 0.75 e 1 para cada efeito.

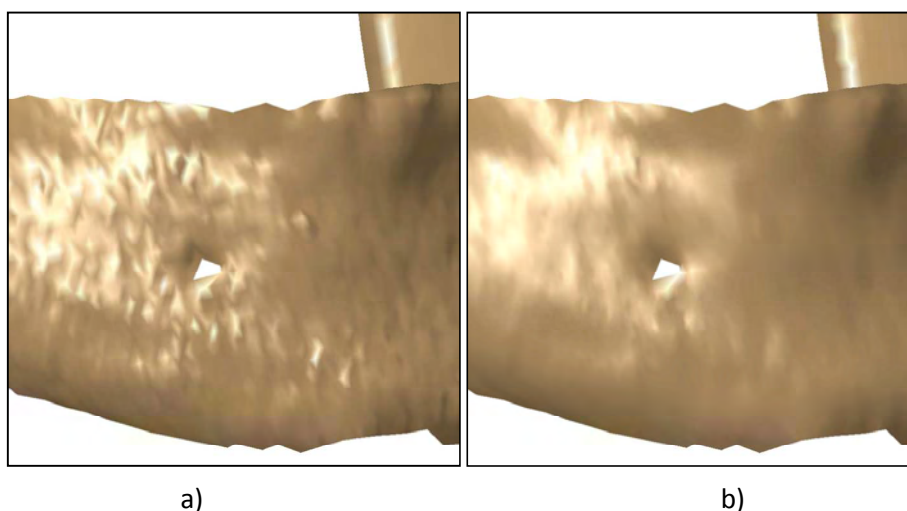


Figura 4.6: Suavização da malha de triângulos no CATIA: a) aspecto granular e b) aspecto suavizado

#### Optimização da malha:

Para melhorar a eficiência do modelo, procedeu-se ao refinamento e posterior reconfiguração da malha. O refinamento foi feito através do comando *decimation*, que recalcula e permite reduzir o número total de triângulos mantendo uma boa aproximação da geometria original. É um processo de avaliação e classificação da vizinhança de cada ponto da malha que, consoante os parâmetros definidos, determina se este deve ou não ser eliminado. Se o ponto é removido, os triângulos a ele associados também são, resultando assim um espaço vazio (Zorin, 2002). Nas zonas planas ou de menor curvatura a redução do número de triângulos é mais acentuada.

A reconfiguração da malha é feita através do comando *optimize*. É um processo de reorientação dos triângulos que torna a malha mais homogênea, em que as arestas mais longas são partidas e as mais pequenas eliminadas consoante os limites definidos pelo utilizador, sendo que o número de triângulos pode ou não aumentar (Tutorial-CATIA). Assim, na Figura 4.5a apresenta-se a malha do modelo não otimizada e na Figura 4.5b mostra-se essa mesma malha após os processos de refinamento e reconfiguração.

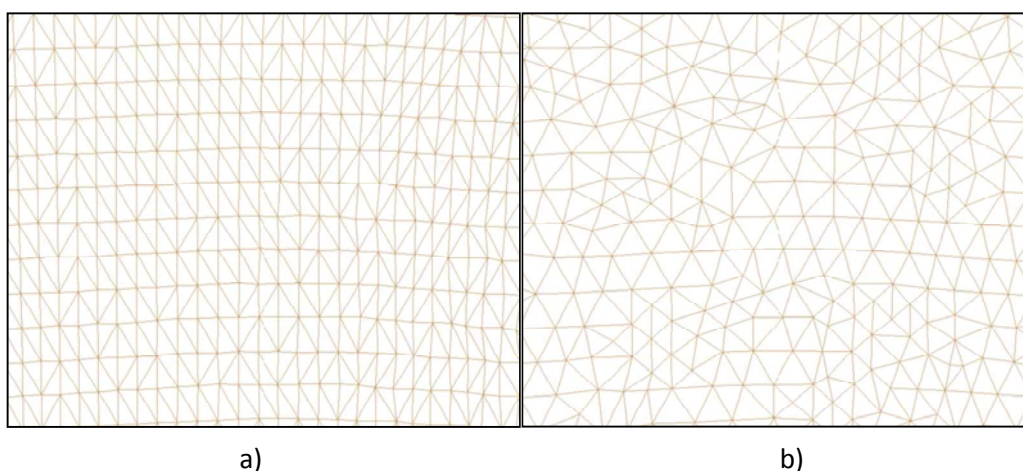


Figura 4.7:Optimização da malha de triângulos no CATIA: a) malha não otimizada e b) malha otimizada

#### 4.2.1 Geração da superfície

Na geração da superfície, tal como foi referido anteriormente, foram utilizados dois métodos diferentes, um para as formas irregulares e outro para as formas regulares (esferas e planos).

##### Formas irregulares

Na geração da superfície de forma automática, entre outros parâmetros, pode-se variar a sua *resolução* e o *desvio médio limite* de modo a obter melhores resultados. O valor da *resolução da superfície* representa o número máximo de superfícies que o modelo pode ter. Num caso limite, o número de superfícies seria igual ao número de triângulos da malha, ou seja, o seu valor máximo é igual ao número de triângulos. O *desvio médio limite* representa o valor máximo permitido, para os desvios entre a superfície e a malha de triângulos devem atingir, não assegurando no entanto que esse limite seja atingido, tal como o valor da resolução.

##### Formas regulares

No estudo das formas regulares, o método utilizado para gerar a superfície foi o reconhecimento da forma geométrica da malha de triângulos. Este reconhecimento pode ser automático, em que o software tenta reconhecer qual a forma geométrica da malha, ou por outro lado, pode-se aproximar a superfície a uma forma geométrica definida pelo utilizador. As formas disponibilizadas pelo CATIA são: plano, esfera, cilindro e cone.

A sequência do processo descrito no ponto 4.2 correspondente à criação de superfícies irregulares, é apresentada nas imagens da Figura 4.6: a) nuvem de pontos, b) malha de triângulos e c) superfície sobreposta à malha.

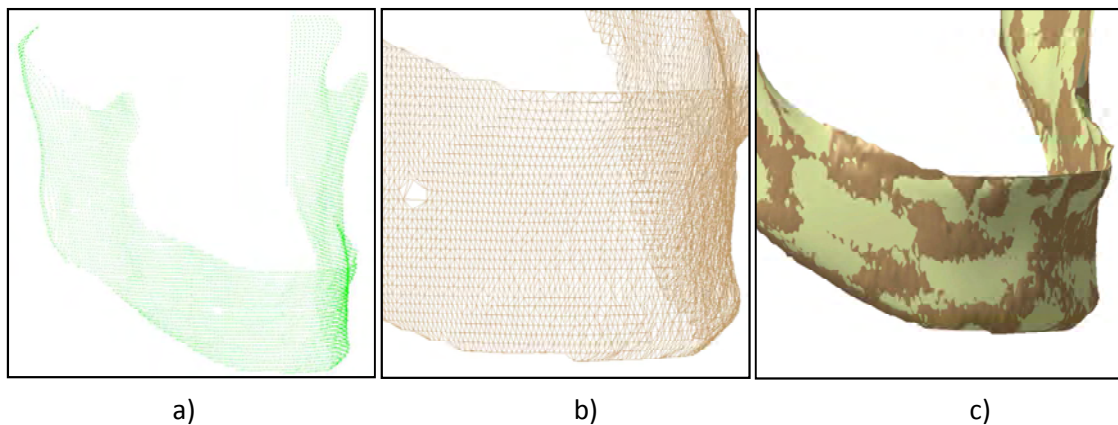


Figura 4.8: Processo de criação de superfícies no CATIA

#### 4.3 Definição dos parâmetros analisados

Na geração de superfícies de formas irregulares, os parâmetros analisados na avaliação dos modelos foram: o número de faces, o desvio máximo, o desvio médio e a percentagem de pontos. O raio, o desvio padrão, o desvio máximo e o desvio médio foram os parâmetros estudados na

geração de superfícies de formas regulares. As suas definições podem ser consultadas na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Definições dos parâmetros de análise no CATIA

Parâmetros de análise	Definição
Número de faces	Número de superfícies geradas através da malha de triângulos.
Percentagem de pontos	Percentagem de pontos que se encontram dentro dos limites estabelecidos na geração da superfície. Estes limites incluem a <i>resolução da superfície</i> e <i>desvio médio limite</i> .
Desvio máximo	Máximo desvio medido, em módulo, entre a superfície e a malha de triângulos.
Desvio médio	Desvio médio medido entre a superfície e a malha de triângulos e calculado através do módulo de todos os desvios.
Desvio padrão	Média das diferenças entre o valor de cada desvio e o desvio médio.
Raio	Distância do centro a um ponto qualquer da esfera.

Os parâmetros descritos anteriormente foram os escolhidos para avaliar a qualidade da superfície obtida. O número de faces permite perceber se o modelo gerado dá origem a um ‘ficheiro pesado’ ou não. A percentagem de pontos faz uma avaliação global do desempenho da superfície enquanto os desvios obtidos são um factor essencial quando se trata de avaliar a precisão dos modelos, ou seja, o rigor com que a superfície se adapta à malha de triângulos. No caso particular do raio da esfera, é possível através da sua análise verificar se ocorreram mudanças significativas na geometria do modelo gerado.

## 4.4 Estudo de formas irregulares

### 4.4.1 Resumo dos estudos realizados

Inicialmente foi feita uma análise a vários tipos de filtro homogéneo e adaptativo, ou seja, com diferentes percentagens de pontos filtrados para cada um. De seguida foi seleccionada uma percentagem de remoção para cada filtro e estudou-se o efeito de suavização e de optimização nas malhas de triângulos geradas a partir desses filtros e ainda na malha de triângulos gerada a partir da nuvem sem qualquer filtro. Finalmente estudaram-se dois parâmetros utilizados na geração de superfícies, a *resolução* e o *desvio médio limite*. A Tabela 4-2 pretende fazer uma breve introdução desses mesmos estudos e também apresentar quais foram os modelos utilizados em cada um deles.

Na optimização da malha, tentou-se igualar o número de triângulos final (pós optimização) ao número de triângulos inicial (sem optimização) e é necessário ter em conta que quando a malha é

otimizada, significa que foi previamente suavizada. Relativamente aos estudos da resolução da superfície e do desvio médio limite, estes foram realizados com malhas não suavizadas.

Tabela 4-2: Resumo do estudo realizado no modelo de formas irregulares

Estudo realizado	Modelo estudado	Parâmetros de análise
Utilização de filtros adaptativos e homogêneos	Nuvem de pontos	
Suavização da malha	Malha de triângulos:	Número de faces
Optimização da malha suavizada	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem filtro</li> </ul>	Desvio máximo
Aumento da resolução da superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtro Adaptativo 30%</li> </ul>	Desvio médio
Diminuição do desvio médio limite da superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtro Homogêneo 10%</li> </ul>	% Pontos

#### 4.4.2 Nomenclatura utilizada

Nos gráficos dos estudos da utilização de filtro e do efeito da suavização foram utilizadas algumas abreviaturas. O seu significado pode ser consultado na tabela seguinte.

Tabela 4-3: Nomenclatura utilizada nos gráficos

Nomenclatura	Significado	Definição
Sem filtro	Sem filtro	Não foi utilizado qualquer tipo de filtro
Adap #	Filtro adaptativo	Homogêneo e adaptativo diz respeito ao tipo de filtro utilizado.
Homo #	Filtro homogêneo	O valor # indica qual a percentagem (%) de pontos retirada ao modelo.
Simples #	Efeito simples	Simples e duplo dizem respeito ao tipo de suavização utilizado.
Duplo #	Efeito duplo	O valor # indica qual a intensidade do coeficiente de suavização.

#### 4.4.3 Utilização de filtro na nuvem de pontos inicial

Para uma melhor compreensão do efeito da utilização de filtro na nuvem de pontos inicial, a Tabela 4-4 apresenta as seguintes características dos modelos estudados: o número de pontos de cada modelo, a percentagem de pontos restantes depois da aplicação de filtro, a distância mínima entre pontos na aplicação de filtro (espaçamento) e o número de triângulos obtidos na geração da malha.



Tabela 4-4: Características dos modelos estudados

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Número de pontos final</b>	<b>% de pontos final</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>	<b>Número de triângulos</b>
<b>Sem filtro</b>	<b>9555</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>18668</b>
Adaptativo 10%	8601	90,02	0,0153	16842
Adaptativo 22%	7481	78,29	0,033	14645
Adaptativo 30%	6690	70,02	0,0431	13098
Adaptativo 40%	5733	60,00	0,0569	11213
Homogéneo 10%	8596	89,96	0,575	16768
Homogéneo 22%	7482	78,30	0,628	14717
Homogéneo 30%	6692	70,04	0,716	13013
Homogéneo 40%	5733	60,00	0,943	11222

O gráfico da Figura 4.7 apresenta o efeito da utilização de vários filtros do tipo adaptativo e homogéneo em relação à nuvem de pontos inicial, ou seja, em relação à nuvem sem utilização de filtro. Na Tabela 4-5 apresentam-se os resultados da geração de superfícies do modelo sem filtro, que servem de referência à análise percentual realizada.

Tabela 4-5: Dados da geração de superfícies do modelo sem filtro

<b>Dados de referência</b>			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio médio	% de Pontos
210	3,331mm	0,1699mm	96%

Como se pode observar no gráfico da Figura 4.9, de uma forma geral a utilização de filtro levou ao aumento do número de faces e à diminuição significativa do desvio máximo da superfície, identificando-se claramente o efeito do filtro na remoção de ruído. O desvio médio não sofreu grandes variações na utilização de filtros até 30% dos pontos iniciais, aumentando ligeiramente para filtros mais acentuados. Finalmente verificou-se que a percentagem de pontos dentro dos limites estabelecidos tem tendência a diminuir com a utilização de filtro.

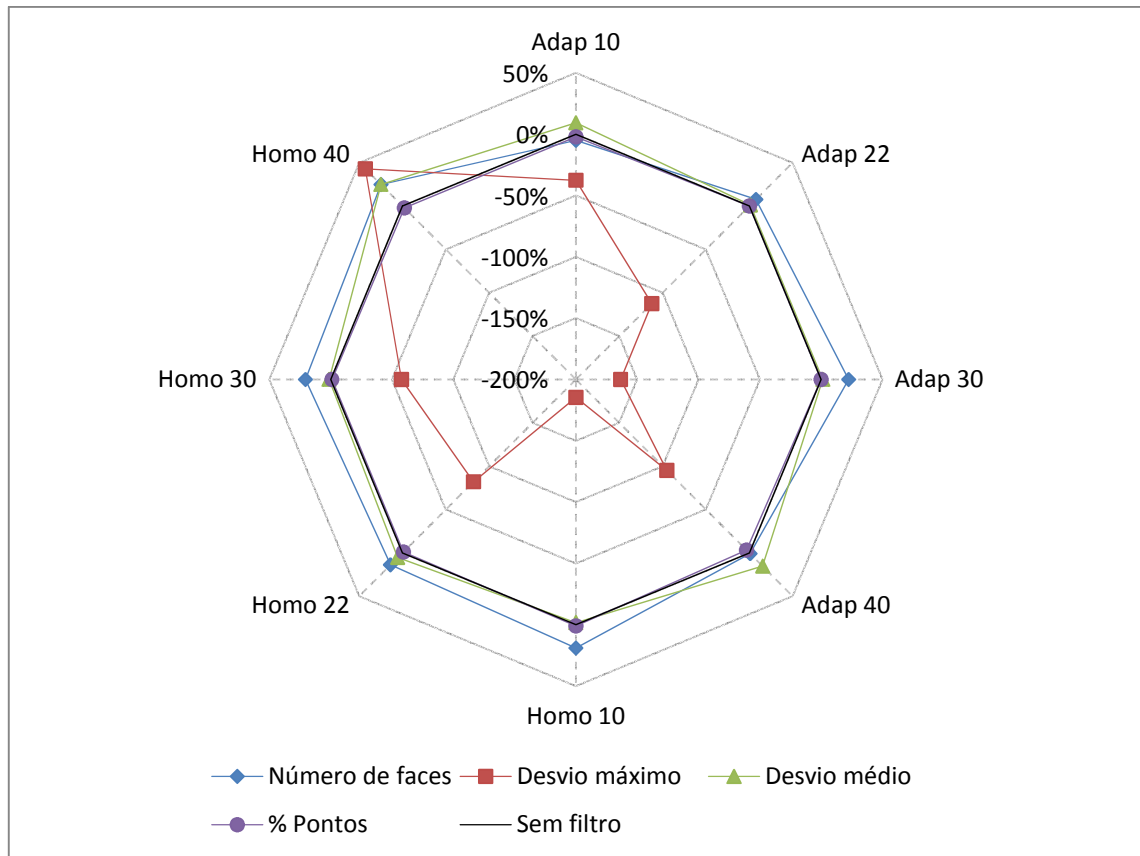


Figura 4.9: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial

#### Análise da utilização de filtro:

O facto de a utilização de filtro diminuir o número total de pontos e previsivelmente se obter um menor número de triângulos, teoricamente não deveria gerar mais faces. No entanto, o número reduzido de triângulos dá origem a uma malha mais grosseira que não permite a adaptação eficaz das faces à forma da malha, forçando a criação de um maior número de superfícies.

A diminuição do desvio máximo da superfície é um dos resultados mais visíveis da utilização de filtro. Uma vez que os pontos mais afastados da nuvem são removidos, a malha criada tem menos elementos pontiagudos e a superfície adapta-se com mais precisão à malha de triângulos dando origem a desvios menores.

A utilização de filtros muito acentuados cria uma malha com pouco detalhe, dificultando a adaptação da superfície à malha de triângulos e consequente aumento do desvio médio. A percentagem de pontos dentro dos limites estabelecidos diminui devido ao aumento do desvio médio da superfície, uma vez que este é um dos parâmetros avaliados.

#### 4.4.4 Suavização da malha de triângulos

Os gráficos seguintes apresentam o estudo relativo ao efeito de suavização da malha. Foram realizados testes em três malhas de triângulos diferentes: malha sem filtro (Figura 4.10), com filtro adaptativo 30% (Figura 4.11) e com filtro homogêneo 10% (Figura 4.12). Todos os

parâmetros são analisados em relação à malha não suavizada. A Tabela 4-6 apresenta os resultados dos três modelos não suavizados, que serviram de referência ao estudo de suavização.

Tabela 4-6: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados

Dados de referência				
Modelo	Número de faces	Desvio máximo (mm)	Desvio médio (mm)	% de Pontos
Sem filtro	210	3,331	0,1699	96
Filtro Adaptativo	257	1,264	0,1719	96
Filtro Homogêneo	250	1,167	0,167	97

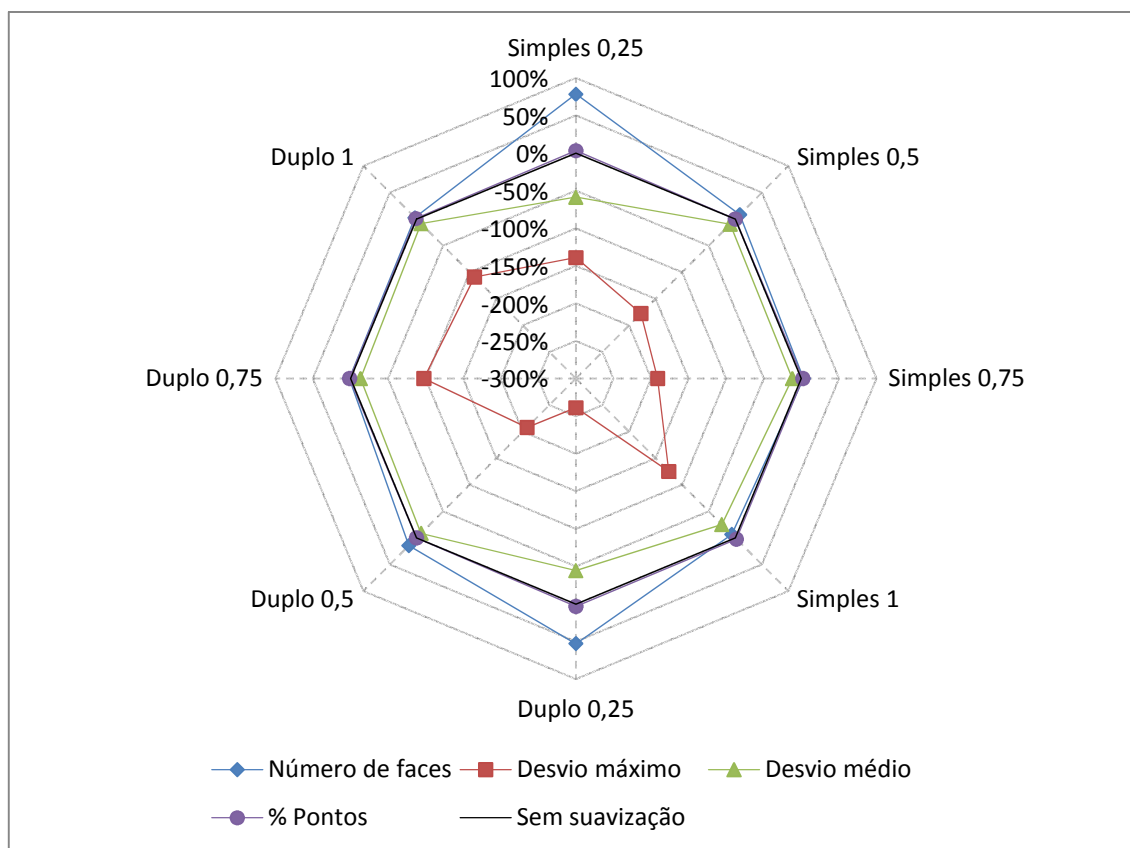


Figura 4.10: Análise do efeito de suavização na malha sem utilização de filtro

Na superfície gerada sem utilização de filtro (Figura 4.10), verificou-se um aumento significativo do número de faces na utilização do coeficiente 0.25 sendo que para os restantes tipos de suavização não se observaram oscilações significativas. O desvio máximo sofreu uma diminuição intensa, nunca inferior a 100% enquanto o desvio médio diminuiu sempre com a utilização de suavização, verificando-se uma diminuição mais acentuada correspondente ao maior aumento do número de faces, ou seja, para o coeficiente 0.25. A percentagem de pontos é igual para o coeficiente 0.5 e maior nos restantes casos.

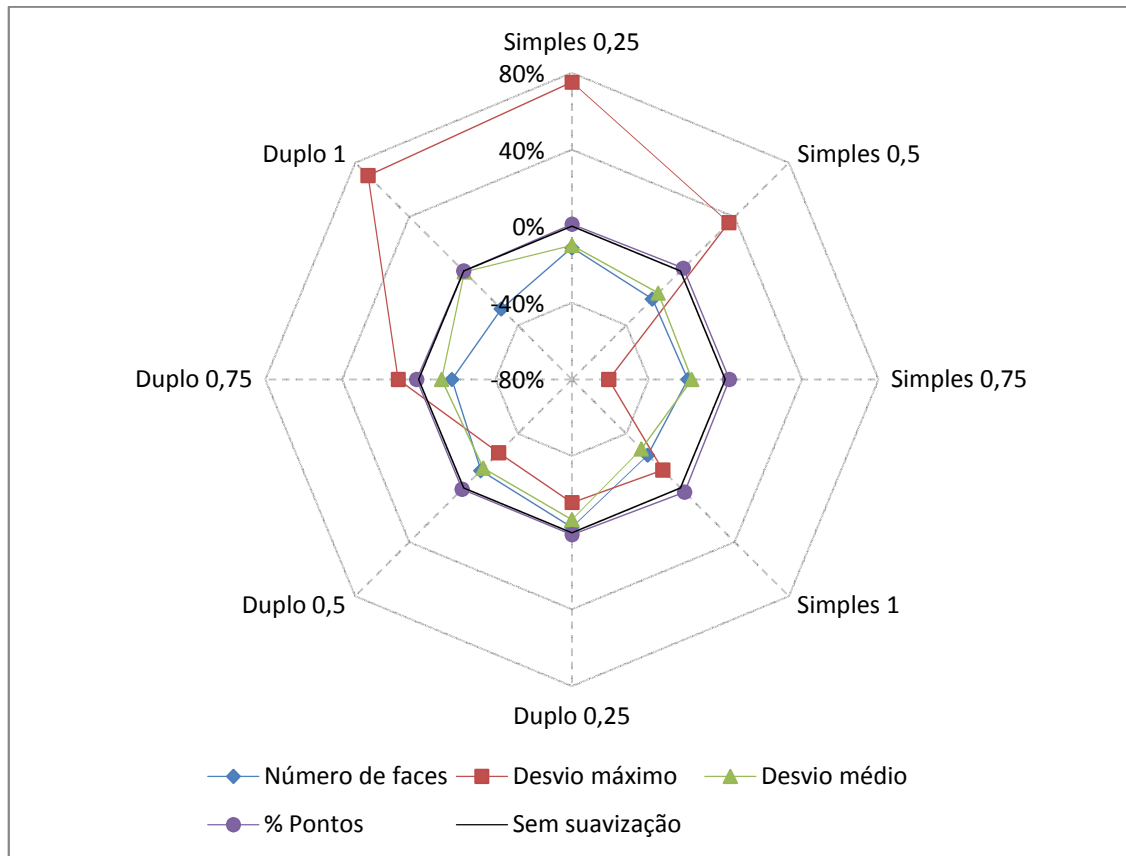


Figura 4.11: Análise do efeito de suavização na malha com filtro adaptativo 30%

No gráfico da Figura 4.11 observou-se uma diminuição do número de faces em todos os tipos de suavização, cada vez mais acentuada com o aumento do coeficiente. No desvio máximo não se verificou nenhuma tendência, enquanto o desvio médio diminuiu sempre com a utilização de suavização. A percentagem de pontos dentro da tolerância estabelecida seguiu a tendência da malha sem filtro e aumenta em praticamente todos os casos.

Com a utilização de filtro homogêneo (Figura 4.12), observaram-se o aumento e a diminuição significativa do número de faces para efeito duplo 0.25 e efeito simples 1. O desvio máximo é sempre maior quando a malha é suavizada, no entanto o desvio médio é sempre menor, à exceção do efeito simples 0.25. Acompanhando a tendência de resultados anteriores, verificou-se o maior aumento da percentagem de pontos correspondente à diminuição mais acentuada do desvio médio.

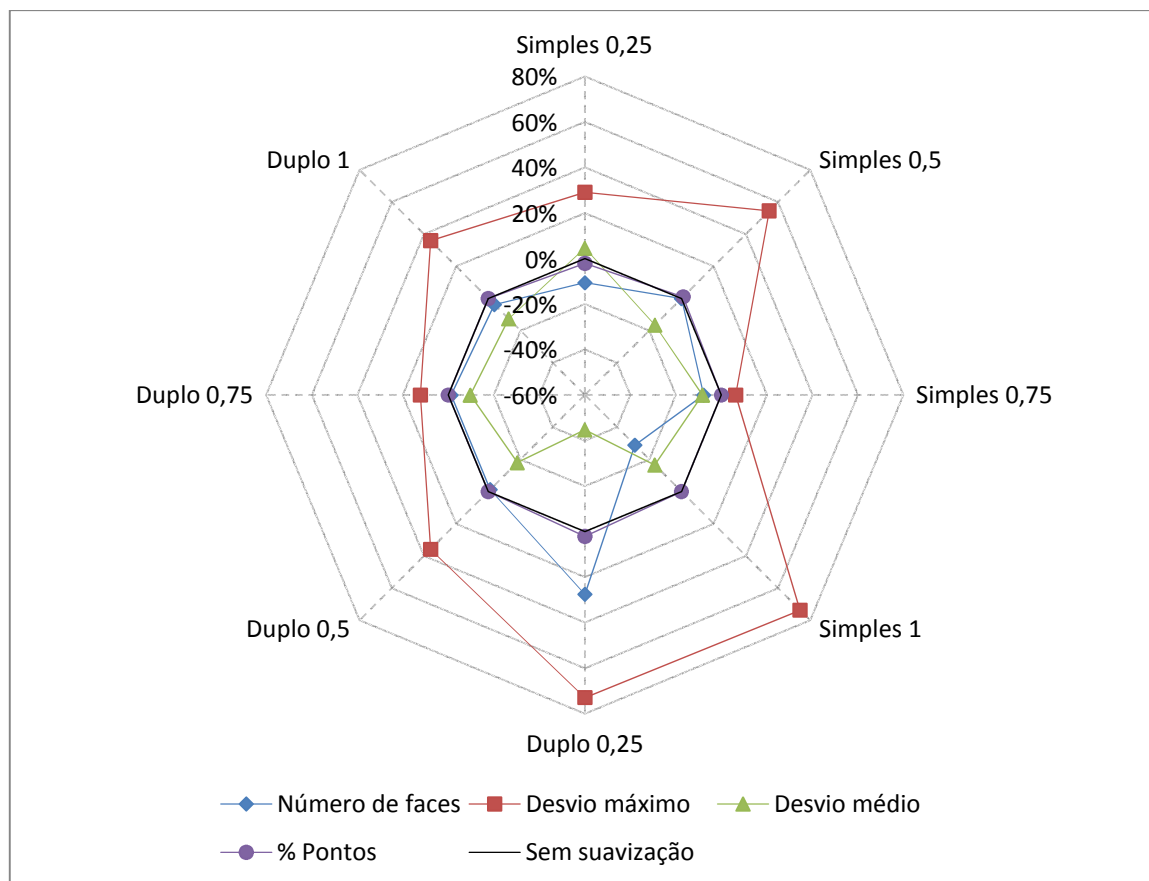


Figura 4.12: Análise do efeito de suavização na malha com filtro homogêneo 10%

#### Análise do efeito de suavização:

No que diz respeito ao número de faces, observaram-se tendências diferentes nos três modelos. Na malha sem filtro, apenas se verificou o aumento do número de faces para o coeficiente mais baixo, provavelmente porque uma intensidade muito baixa não é suficiente para suavizar os vértices mais acentuados da malha dificultando a adaptação da superfície e consequente aumento do número de faces. No filtro adaptativo, quanto maior for o coeficiente menor é o número de faces uma vez que o aumento da intensidade de suavização pode levar à ampliação da área plana facilitando a adaptação da superfície à malha e consequente diminuição do número de faces. Uma vez que na utilização do filtro homogêneo não se verificaram grandes oscilações, pode significar que a suavização não teve um efeito significativo na posição final dos vértices.

O desvio máximo diminui significativamente na malha sem filtro, uma vez sem a utilização de filtro não é removido qualquer ruído e a suavização assume um papel preponderante, ajustando os vértices dos triângulos às curvas da malha. Com a utilização de filtro adaptativo, a existência de áreas planas não permitiu retirar qualquer conclusão. Com filtro homogêneo, o visível aumento do desvio máximo deve-se ao facto de a malha escolhida não ter desvios elevados sem suavização e o reajuste dos vértices pode levar a que esses desvios ocorram.

Em todos os casos se observou uma tendência de redução do desvio médio. O facto de os raios mais pequenos serem eliminados e a redução da distância dos vértices mais afastados da malha de triângulos, facilita a adaptação da superfície à malha reduzindo o desvio médio da superfície.

No que diz respeito à percentagem de pontos, na malha sem filtro e na malha com filtro adaptativo verificaram-se os maiores aumentos, concluindo-se que o efeito de suavização é mais notório quando não é aplicado nenhum filtro ou quando se utiliza um filtro adaptativo.

#### 4.4.5 Optimização da malha de triângulos

Os gráficos seguintes apresentam os resultados do estudo do efeito de optimização, realizado para todos os tipos de suavização testados anteriormente: malha sem filtro (Figura 4.13), com filtro adaptativo 30% (Figura 4.14) e com filtro homogéneo 10% (Figura 4.15). Os parâmetros são analisados em relação à malha não optimizada.

Ao contrário dos dois casos anteriores, em que todos os modelos foram comparados em relação a uma referência. Neste caso, cada modelo optimizado é comparado individualmente com o respectivo modelo não optimizado, ou seja, para cada tipo de suavização existe uma referência como se pode verificar na Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Resultados da geração de superfícies dos modelos não optimizados

Dados de referência					
Tipo de suavização	Modelo	Número de faces	Desvio máximo (mm)	Desvio médio (mm)	% Pontos
Simples 0,25	Sem filtro	375	1,393	0,1071	99
	Adaptativo	231	2,633	0,1563	97
	Homogéneo	226	1,506	0,1746	95
Simples 0,5	Sem filtro	228	1,199	0,1552	96
	Adaptativo	213	1,716	0,1478	98
	Homogéneo	250	1,803	0,1434	98
Simples 0,75	Sem filtro	216	1,144	0,1519	98
	Adaptativo	215	0,7857	0,1463	98
	Homogéneo	232	1,24	0,1542	97
Simples 1	Sem filtro	197	1,479	0,1356	98
	Adaptativo	207	1,118	0,1335	99
	Homogéneo	194	2,327	0,1433	97
Duplo 0,25	Sem filtro	321	0,922	0,1176	99
	Adaptativo	250	1,092	0,161	97
	Homogéneo	319	2,318	0,1154	99
Duplo 0,5	Sem filtro	240	1,081	0,1561	96
	Adaptativo	228	1,004	0,1501	97
	Homogéneo	247	1,586	0,1415	97
Duplo 0,75	Sem filtro	213	1,685	0,1499	97
	Adaptativo	219	1,399	0,1535	97
	Homogéneo	247	1,31	0,1523	97
Duplo 1	Sem filtro	216	1,593	0,1565	97
	Adaptativo	201	2,455	0,1709	96
	Homogéneo	241	1,586	0,1483	97

A Tabela 4-5 apresenta a evolução do número de triângulos durante o processo de otimização da malha. É possível verificar a sua diminuição com o refinamento da malha (*decimate*) e posterior aumento quando a malha é reconfigurada (*optimize*).

Tabela 4-8: Evolução do número de triângulos durante o processo de otimização da malha

Modelo estudado	Número de triângulos inicial	Triângulos após <i>decimate</i>	Triângulos após <i>optimize</i>
Malha sem filtro	18668	14930	19713
Filtro adaptativo 70%	13098	10477	15033
Filtro homogêneo 90%	16768	13413	17095

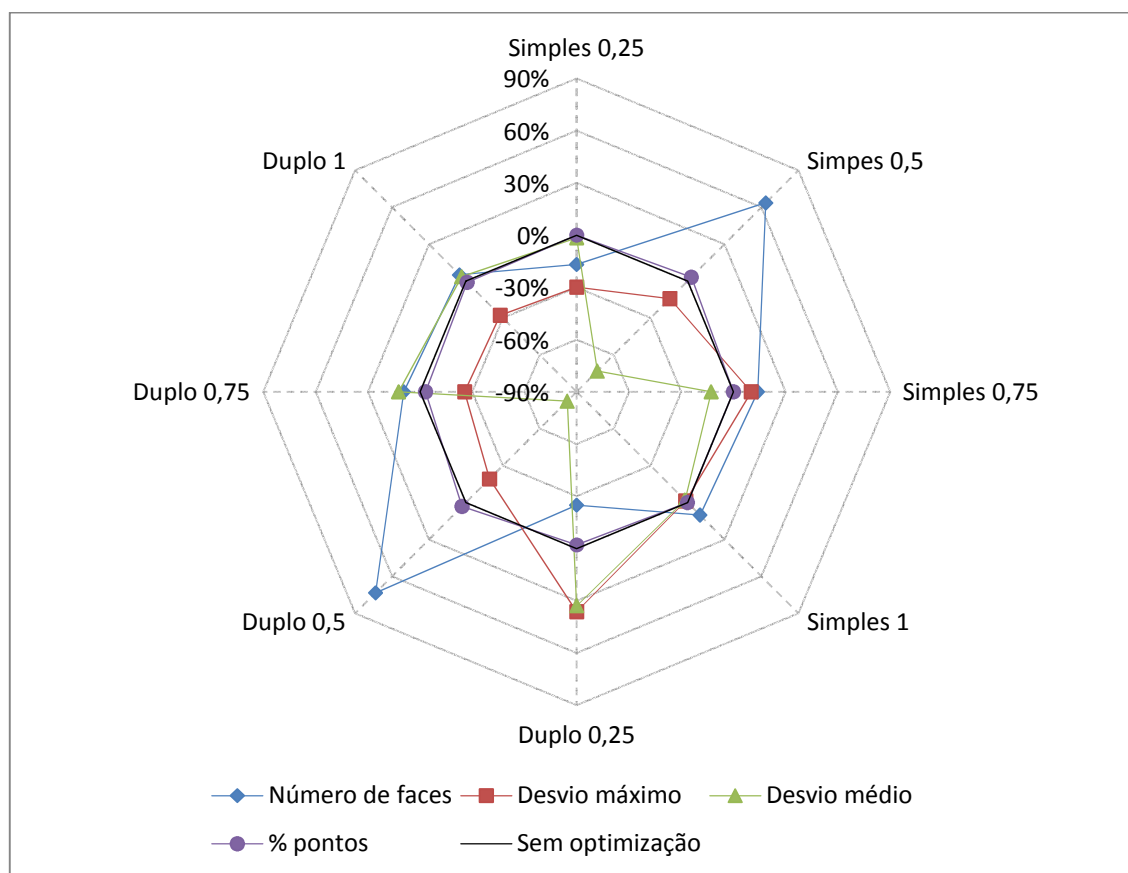


Figura 4.13: Análise do efeito de otimização na malha sem utilização de filtro

Com a otimização da malha sem utilização de filtro (Figura 4.13), verificou-se uma diminuição do número de faces na utilização do coeficiente 0.25 e um aumento para os restantes coeficientes. O desvio médio diminui cerca de 80% com a utilização do coeficiente 0.5 e não sofre oscilações significativas para os restantes tipos de suavização. A percentagem de pontos dentro da tolerância aumenta com a utilização do coeficiente 0.5 e diminui ou mantém-se constante nos restantes.

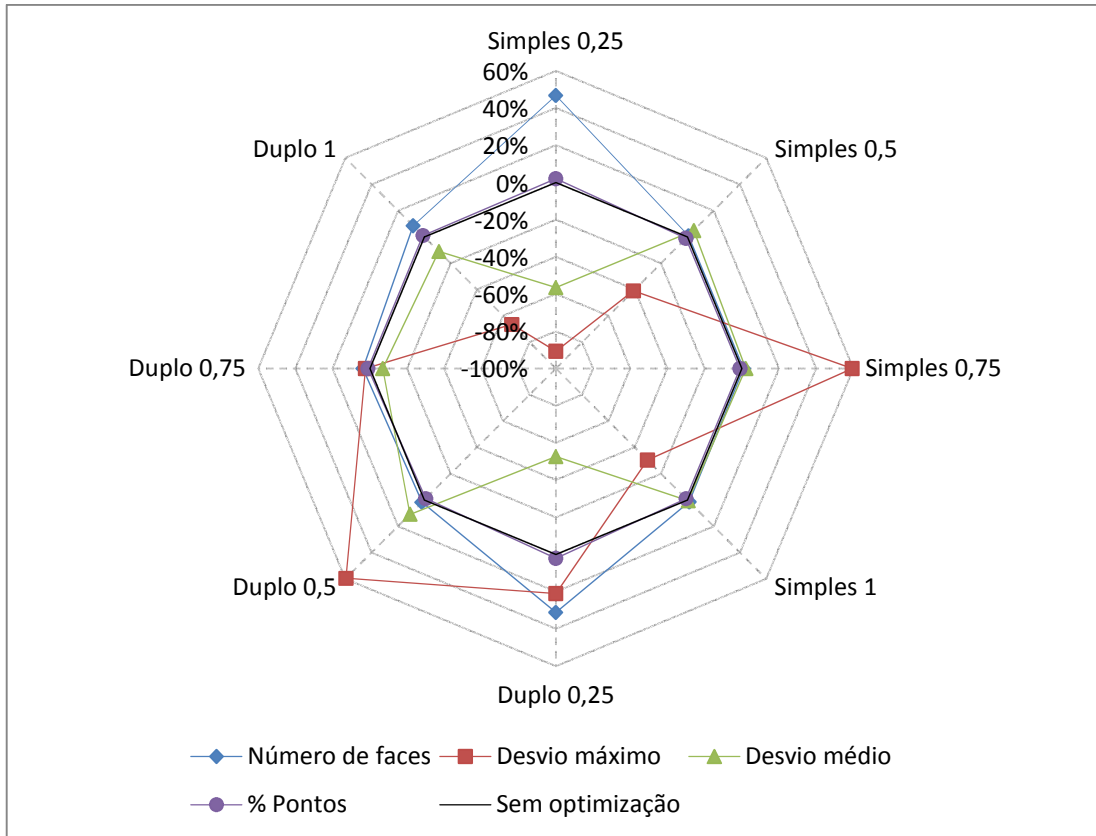


Figura 4.14: Análise do efeito de otimização na malha com filtro adaptativo 30%

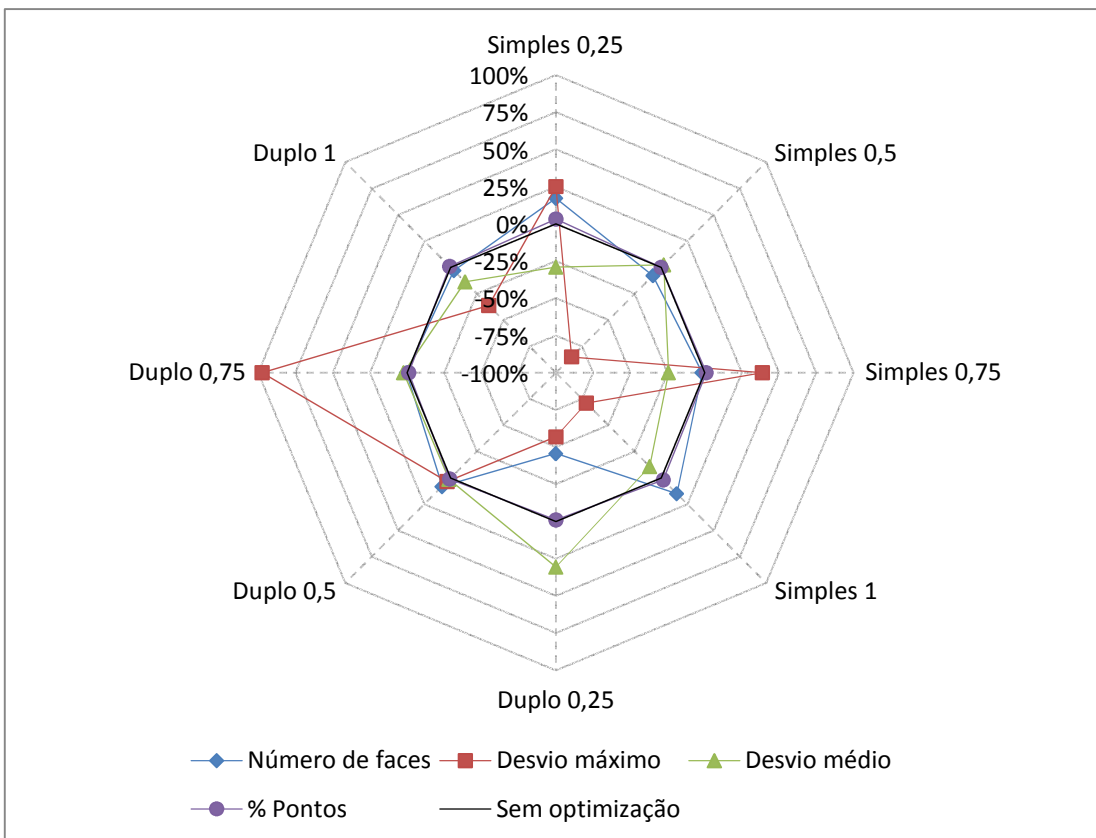


Figura 4.15: Análise do efeito de otimização na malha com filtro homogêneo 10%



Na utilização de filtro adaptativo (Figura 4.14), verificou-se que a optimização da malha levou ao aumento do número de faces em todos os casos, sendo este aumento mais acentuado com coeficiente 0.25. O desvio médio não sofreu oscilações significativas, excepto na utilização do coeficiente 0.25 em que a diminuição é ligeiramente superior aos 30% e a percentagem de pontos dentro dos limites estabelecidos diminui quando o desvio médio aumenta e vice-versa. As oscilações do desvio máximo tiveram um comportamento completamente imprevisível.

Na malha com filtro homogéneo (Figura 4.15), à excepção de uma diminuição acentuada do número de faces para o efeito duplo 0.25, não se observam oscilações significativas. Os resultados no desvio máximo não seguem nenhum tipo de tendência e em relação ao desvio médio, verificou-se uma diminuição relativamente acentuada nos coeficientes 0.25 e 0.75 de efeito simples. Mais uma vez, observou-se o aumento da percentagem do número de pontos dentro da tolerância quando o desvio médio diminui.

#### **Análise do efeito de optimização:**

No que diz respeito ao número de faces, verificaram-se as maiores oscilações na malha sem filtro uma vez que o ruído da nuvem de pontos não foi removido e a malha encontrava-se mais desorganizada. Nas malhas com utilização de filtro apenas se verificou uma diferença significativa do número de faces para o coeficiente 0.25, uma vez que este coeficiente não provoca uma alteração significativa da posição dos vértices e a influência do efeito de optimização foi diminuta. Em relação ao desvio máximo da superfície, verificou-se que o efeito de optimização tem bastante influência em quase todos os tipos de suavização testados.

Também foi possível observar que o número de faces está directamente relacionado com o desvio médio da superfície. Quanto maior for o aumento do número de faces, maior é a diminuição do desvio médio da superfície e vice-versa. O facto de o número de faces ser mais elevado leva a que a adaptação da superfície à malha de triângulos seja mais precisa, originando desvios menores. Naturalmente, com a diminuição do desvio médio da superfície é possível obter mais pontos dentro da tolerância previamente estabelecida.

#### **4.4.6 Análise da resolução da superfície**

De seguida apresenta-se o gráfico relativo ao estudo do aumento da resolução da superfície na malha não suavizada (Figura 4.16). Todos os resultados dizem respeito ao efeito deste aumento em relação ao valor dado, por defeito, pelo software (resolução = 500). No eixo do gráfico, o intervalo de valores entre 750 e 17500 representa a resolução da superfície.

Nos três casos estudados (malha sem filtro, filtro adaptativo 30% e filtro homogéneo 10%), os resultados do aumento da resolução da superfície são idênticos e as conclusões retiradas são naturalmente semelhantes. Por este motivo optou-se por apresentar apenas os resultados da malha sem filtro e fazer uma análise geral dos três casos. Os restantes gráficos podem ser consultados no Anexo I.

Na Tabela 4-9 apresentam-se os resultados do modelo com resolução 500, que serviram de referência ao estudo realizado, apresentado na Figura 4.16.

Tabela 4-9: Resultados da geração de superfícies do modelo com resolução 500

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio médio	% de Pontos
210	3,331mm	0,1699mm	96%

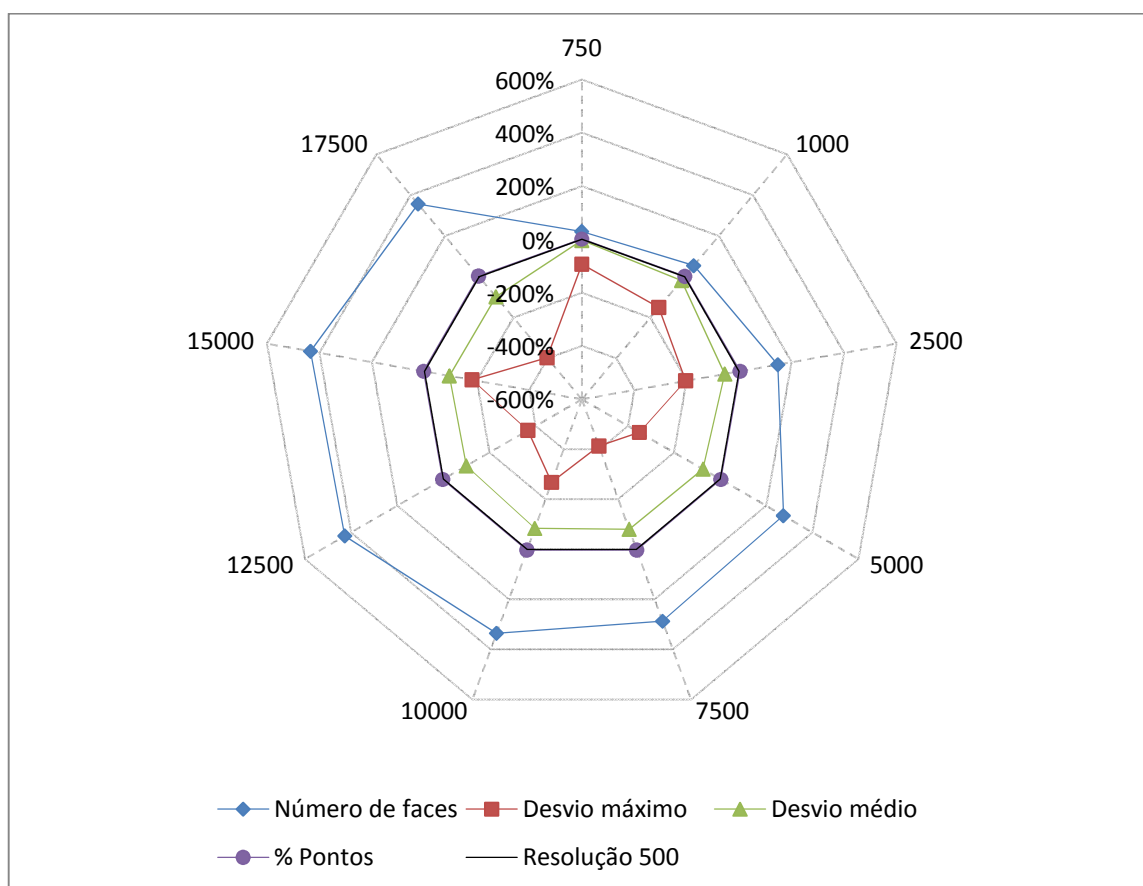


Figura 4.16: Análise do aumento da resolução da superfície na malha sem filtro

Verificou-se que o número de faces aumenta com a resolução da superfície e a amplitude entre o número máximo e mínimo de faces é muito elevada. Também se observou que os desvios máximo e médio diminuem com o aumento da resolução e a percentagem de pontos aumenta atingindo os 99% a partir de uma resolução de 2500.

#### Análise do aumento da resolução:

Com o aumento da resolução da superfície verificou-se um aumento gradual do número de faces. Este aumento é facilmente explicado na medida em que, num caso limite, com a resolução máxima o número de faces seria igual ao número de triângulos. Logo, quanto maior for a resolução, mais faces serão geradas de forma a tentar igualar o número de triângulos.

O desvio máximo diminuiu gradualmente com o aumento da resolução da superfície. O facto do número de faces aumentar proporciona uma adaptação mais fácil e mais precisa da superfície à

malha de triângulos dando origem à diminuição do desvio máximo e a mesma explicação aplica-se à diminuição gradual do desvio médio da superfície. Com o aumento da resolução e consequente diminuição do desvio médio, é previsível que se encontrem mais pontos dentro da tolerância uma vez que o desvio médio limite é um dos factores que determina essa percentagem.

#### 4.4.7 Análise do desvio médio limite da superfície

O desvio médio da superfície é controlado no CATIA por um parâmetro designado *desvio médio limite*. O valor atribuído neste parâmetro estabelece o limite máximo admissível para o desvio médio da superfície em relação à malha de triângulos. O CATIA considera o valor atribuído e faz o ajustamento das superfícies geradas em relação à malha de triângulos de modo a que estas não ultrapassem o valor fixado.

A Figura 4.17 apresenta o estudo da diminuição do *desvio médio limite* da superfície. Os resultados apresentados são relativos a um valor considerado grosseiro: *desvio médio limite* = 1mm. No eixo do gráfico, o intervalo de valores entre 0,9 e 0,1 representa o *desvio médio limite* da superfície.

Tal como se verificou no estudo do aumento da resolução, os resultados observados nas três malhas são idênticos. Por este motivo também se optou por representar apenas os resultados gráficos da malha sem filtro e fazer uma análise geral dos três casos estudados: malha sem filtro, com filtro adaptativo e com filtro homogêneo. Os restantes gráficos podem ser consultados no Anexo II.

A Tabela 4-10 apresenta os resultados do modelo com desvio médio limite = 1, que serviram de referência ao estudo apresentado na Figura 4.17.

Tabela 4-10: Resultados da geração de superfícies do modelo com desvio médio limite = 1mm

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio médio	% de Pontos
136	4,942mm	0,2853mm	97%

Relativamente ao gráfico da Figura 4.17, em todos os casos observou-se um aumento do número de faces com a diminuição do desvio médio limite. Verificou-se ainda que o desvio máximo tem uma ligeira tendência a diminuir com a diminuição do desvio médio limite. O desvio médio efectivo diminui com a diminuição do desvio médio limite e a percentagem de pontos dentro dos limites previamente estabelecidos, entre os quais o desvio médio, tem tendência a diminuir com a diminuição do desvio médio limite.

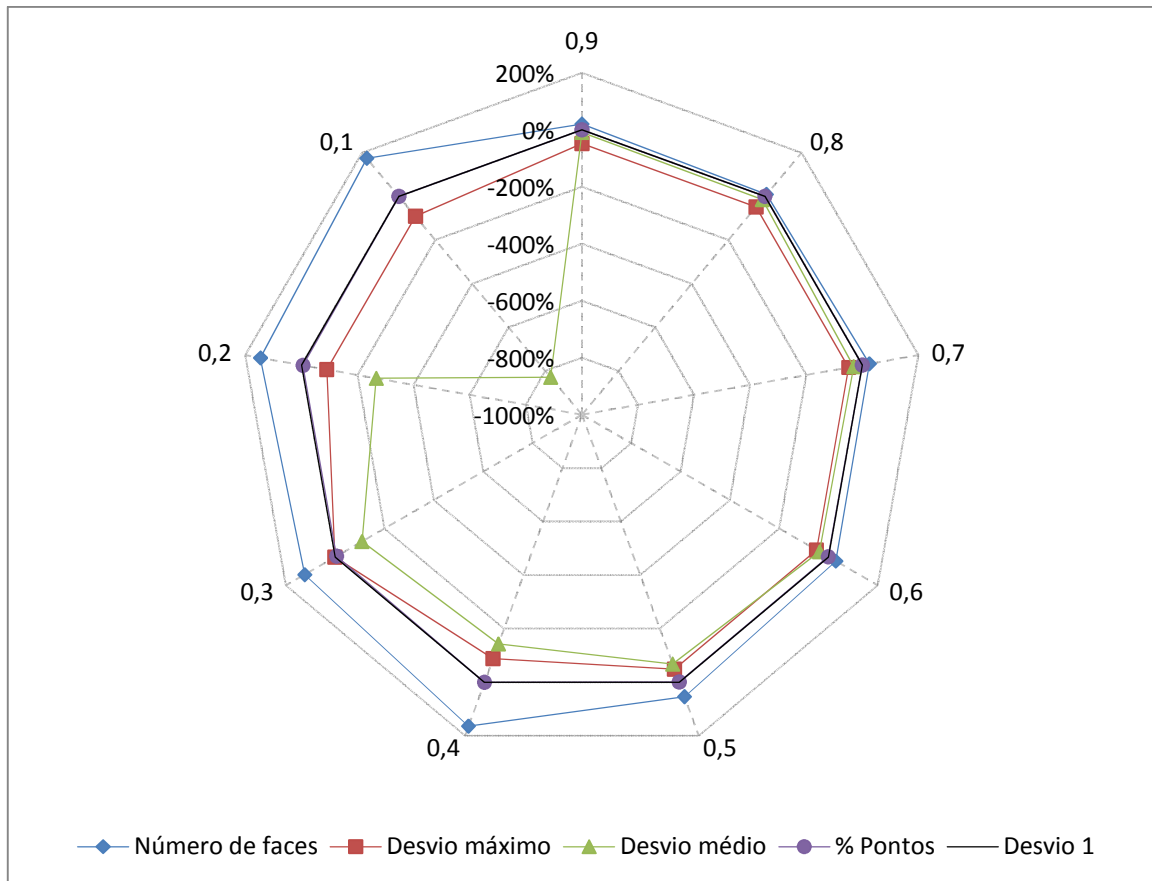


Figura 4.17: Análise da diminuição do desvio médio limite na malha sem filtro

#### Análise da diminuição do desvio médio limite:

A diminuição do *desvio médio limite* leva a que seja necessário criar mais faces de maneira a facilitar a adaptação da superfície à malha de triângulos e assim cumprir o limite estabelecido. O facto de a diminuição do *desvio médio limite* levar ao aumento do número de faces, facilita a adaptação da superfície à malha de triângulos e consequentemente o desvio máximo diminui.

O desvio médio efectivo, como seria previsível, diminui com a diminuição do *desvio médio limite*. Para a gama de valores estudados, a diferença entre os dois desvios varia entre os 150 e 250%, sendo que o desvio médio limite é sempre maior que o efectivo. O *desvio médio limite* é um dos factores que determina a percentagem de pontos dentro da tolerância estabelecida e a sua diminuição torna os limites mais estreitos, diminuindo assim a percentagem de pontos.

## 4.5 Estudo de superfícies de formas regulares

### 4.5.1 Resumo dos estudos realizados

Neste capítulo são apresentados alguns resultados do estudo realizado sobre a geração de superfícies de formas regulares: esférica e plana. Inicialmente realizou-se uma análise aos filtros utilizados e de seguida foi analisado o tipo de reconhecimento da forma geométrica. Finalmente estudou-se o efeito de suavização e de optimização da malha de triângulos. As Tabelas 4-11 e 4-12 pretendem fazer uma breve introdução aos resultados que se podem observar nos gráficos apresentados de seguida.

No modelo do plano, o reconhecimento automático e o planar geraram os mesmos resultados e por este motivo não é apresentado o estudo de comparação dos mesmos. Nos estudos de suavização e optimização apenas foram realizados nos modelos com reconhecimento esférico e plano, para a esfera e o plano respectivamente.

Tabela 4-11: Resumo do estudo realizado no modelo esférico

Estudo realizado	Modelo estudado	Parâmetros de análise
Utilização de filtros adaptativos e homogéneos	Nuvem de pontos da esfera	
Tipo de reconhecimento geométrico	Malha de triângulos da esfera: <ul style="list-style-type: none"> <li>Todos os filtros testados</li> </ul>	Raio Desvio máximo
Suavização da malha	Malha de triângulos esfera: <ul style="list-style-type: none"> <li>Sem filtro</li> <li>Filtro Adaptativo 10%</li> <li>Filtro Homogéneo 10%</li> </ul>	Desvio médio Desvio padrão
Optimização na malha suavizada		

Tabela 4-12: Resumo do estudo realizado no modelo plano

Estudo realizado	Modelo estudado	Parâmetros de análise
Utilização de filtros adaptativos e homogéneos	Nuvem de pontos do plano	
Suavização da malha	Malha de triângulos do plano: <ul style="list-style-type: none"> <li>Sem filtro</li> <li>Filtro Adaptativo 10%</li> <li>Filtro Homogéneo 10%</li> </ul>	Desvio máximo Desvio médio Desvio padrão
Optimização na malha suavizada		

#### 4.5.1 Utilização de filtro em formas regulares

As Tabelas 4-13 e 4-14 apresentam as características dos modelos, após utilização de filtro, de forma esférica e forma plana, respectivamente.

Tabela 4-13: Características dos modelos esféricos

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Número de pontos final</b>	<b>% de pontos final</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>	<b>Número de triângulos</b>
<b>Sem filtro</b>	<b>1685</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>3267</b>
Adaptativo 10%	1516	89,97	0,0132	2935
Adaptativo 20%	1347	79,94	0,0285	2616
Adaptativo 30%	1174	69,67	0,0406	2278
Adaptativo 40%	1013	60,12	0,053	1962
Adaptativo 48%	876	51,99	0,0618	1692
Homogéneo 10%	1529	90,74	1,001	2962
Homogéneo 20%	1353	80,30	1,0249	2615
Homogéneo 30%	1180	70,03	1,076	2287
Homogéneo 40%	1011	60,00	1,15	1946
Homogéneo 48%	875	51,93	1,32	1679

Tabela 4-14: Características dos modelos planos

<b>Tipo de filtro</b>	<b>Número de pontos final</b>	<b>% de pontos final</b>	<b>Espaçamento (mm)</b>	<b>Número de triângulos</b>
<b>Sem filtro</b>	<b>1777</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>3355</b>
Adaptativo 10%	1586	89,25	0,0226	2991
Adaptativo 20%	1420	79,91	0,0406	2672
Adaptativo 30%	1245	70,06	0,057	2341
Adaptativo 40%	1065	59,93	0,075	1999
Homogéneo 10%	1586	89,25	0,8774	2998
Homogéneo 20%	1423	80,08	0,946	2682
Homogéneo 30%	1223	68,82	1,001	2295
Homogéneo 40%	1071	60,67	1,005	1999

Os gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, o primeiro relativo à esfera e o segundo ao plano, apresentam os resultados do estudo da utilização de filtro em formas regulares. A análise foi realizada em relação à nuvem de pontos inicial, ou seja, sem utilização de filtro.

Na Tabela 4-15 são apresentados os dados da esfera e do plano sem utilização de filtro, que serviram de referência ao estudo da utilização de filtros em formas regulares.

Tabela 4-15: Resultados da geração de superfícies da esfera e do plano sem utilização de filtro

Dados de referência				
Elemento	Raio	Desvio máximo	Desvio médio	Desvio padrão
Esfera	19,6312mm	0,8267mm	0,0887mm	0,0835mm
Plano	-	0,5211mm	0,1144mm	0,0886mm

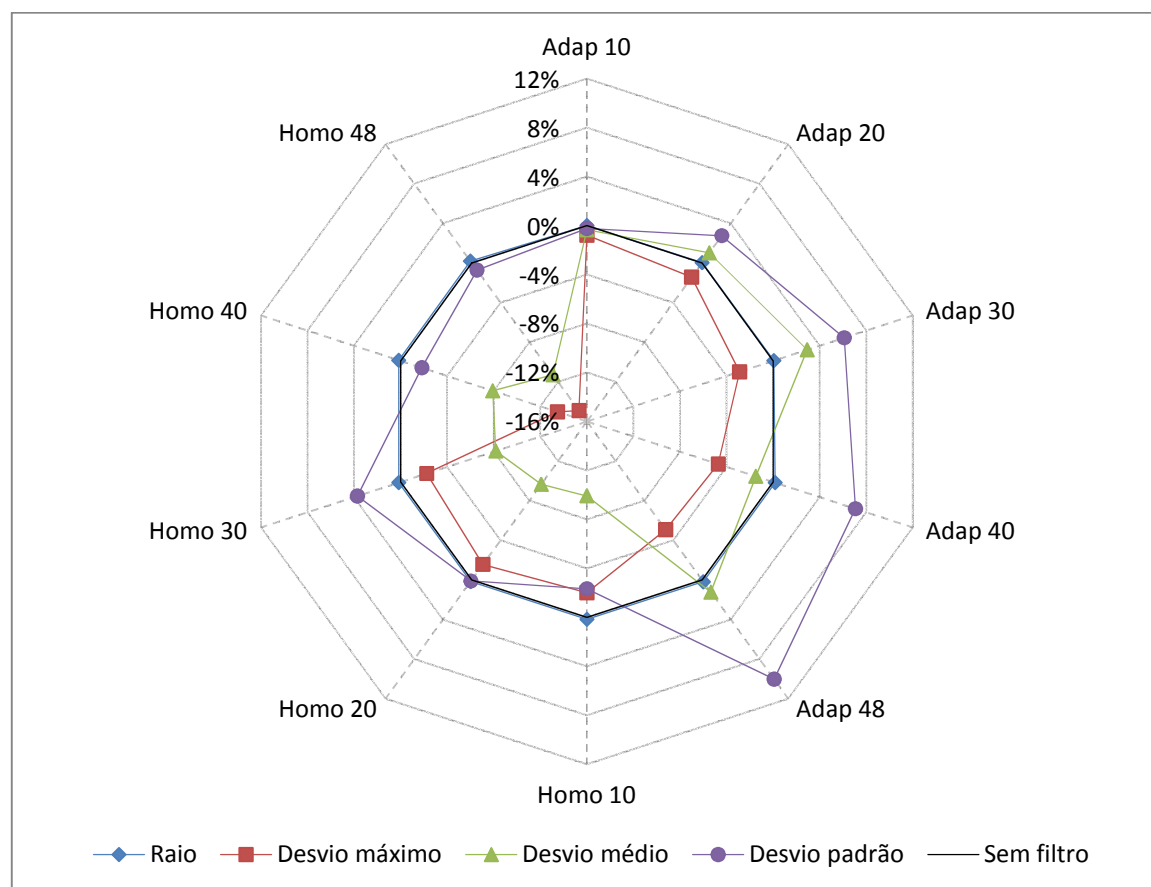


Figura 4.18: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial da esfera

No gráfico da Figura 4.18 pode-se observar que o raio da esfera permanece praticamente constante com a utilização de filtro. Verificou-se ainda que o desvio máximo da superfície diminui em todos os casos, e a diminuição é acentuada com o aumento da percentagem de remoção de pontos. Na utilização de filtros homogêneos observou-se uma diminuição do desvio médio entre os 8 e os 11%. A utilização de filtros adaptativos levou a um aumento gradual do desvio padrão com o aumento da percentagem de pontos removidos.

Relativamente ao gráfico da Figura 4.19, no modelo plano, com a utilização de filtro adaptativo verificou-se uma ligeira diminuição do desvio máximo, que por sua vez se acentua com o aumento do número de pontos removidos. Pelo contrário, todos os filtros homogêneos deram origem ao aumento do desvio máximo. O desvio médio e o desvio padrão aumentam em todos os filtros estudados sendo este aumento superior nos filtros mais acentuados.

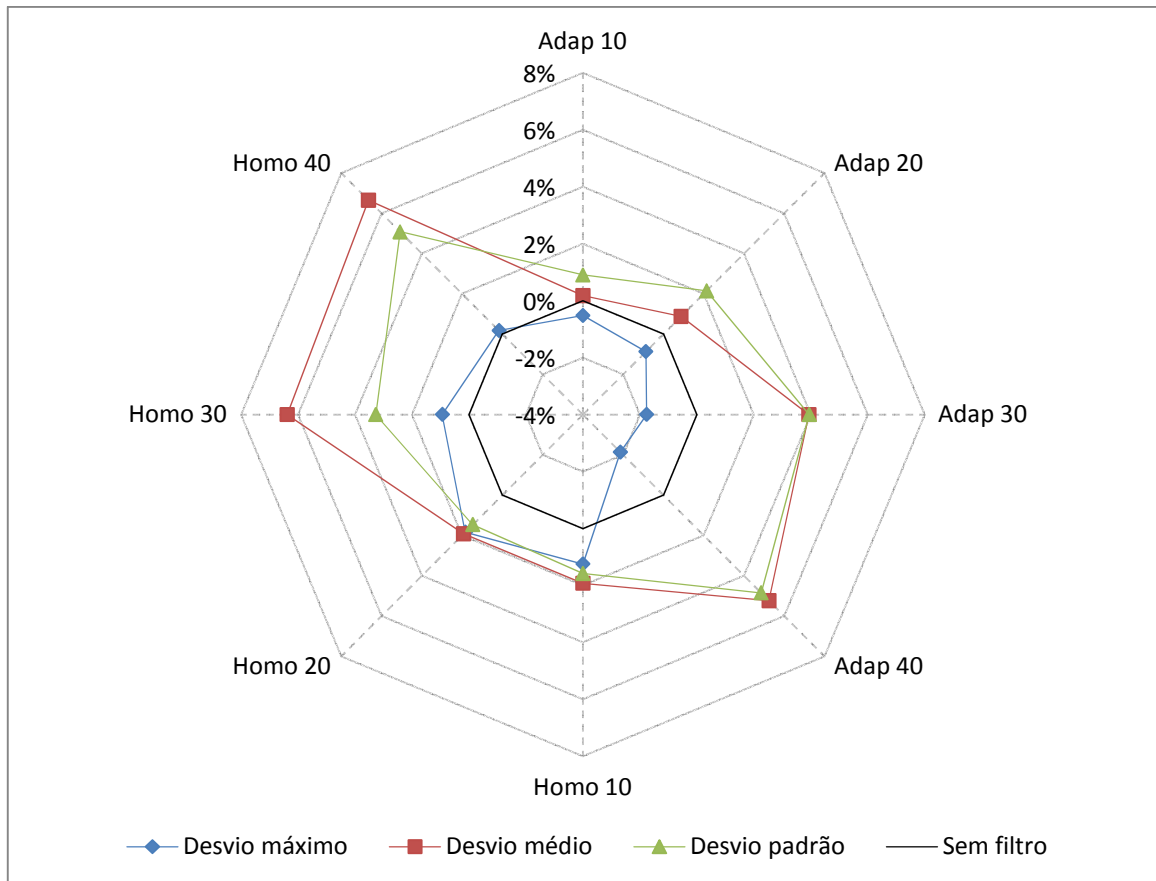


Figura 4.19: Análise da utilização de filtro em relação à nuvem de pontos inicial do plano

#### Análise da utilização de filtro em formas regulares

A diminuição do desvio máximo é um dos resultados mais visíveis da utilização de filtro. Os pontos mais afastados da nuvem são removidos e consequentemente a malha de triângulos torna-se mais uniforme, logo o reconhecimento da forma geométrica da malha de triângulos é mais preciso dando origem a desvios menores. No modelo plano, a utilização de baixas percentagens de remoção de pontos com filtro homogêneo não foi suficiente para remover o ruído.

Com a utilização do filtro homogêneo, a formação de uma malha mais uniforme leva à diminuição do desvio médio do modelo esférico. No entanto, com o filtro adaptativo não se verificou nenhuma tendência uma vez que a sua utilização dá origem a zonas sem pontos criando dificuldades ao posicionamento da superfície quando é feito o reconhecimento da forma geométrica. No que diz respeito ao plano, o facto de este apresentar pouco ruído, leva a que a utilização de filtro retire informação fundamental à geração da superfície e por este motivo quanto maior for o número de pontos retirados maior será o desvio médio.

No modelo esférico, a formação de áreas planas com a utilização do filtro adaptativo leva a que os desvios entre a malha e a superfície sejam mais irregulares provocando o aumento do desvio padrão. Na utilização do filtro homogêneo, o facto de os pontos serem removidos uniformemente dá origem a oscilações numa amplitude bastante reduzida. A justificação apresentada ao aumento do desvio médio no modelo do plano também se aplica ao aumento do desvio padrão.



#### 4.5.2 Reconhecimento da forma geométrica

O gráfico da Figura 4.20 apresenta o efeito provocado pela utilização do reconhecimento esférico da malha de triângulos. Foram realizados testes com todos os filtros utilizados no estudo anterior e os parâmetros são analisados em relação ao reconhecimento automático da esfera.

A Tabela 4-16 apresenta os resultados da geração de superfície dos modelos esféricos com a utilização do reconhecimento automático, para cada tipo de filtro testado.

Tabela 4-16: Resultados da geração de superfícies da esfera com reconhecimento automático

Dados de referência				
Tipo de filtro	Raio (mm)	Desvio máximo (mm)	Desvio médio (mm)	Desvio padrão (mm)
Sem filtro	19,6832	0,7094	0,1041	0,0835
Adaptativo 10	19,6823	0,7133	0,0809	0,0833
Adaptativo 20	19,6853	0,7054	0,0826	0,0858
Adaptativo 30	19,6826	0,7116	0,1048	0,0886
Adaptativo 40	19,6826	0,7260	0,1007	0,0894
Adaptativo 48	19,6872	0,7165	0,1043	0,0928
Homogêneo 10	19,6816	0,7333	0,0951	0,0816
Homogêneo 20	19,6813	0,7307	0,0960	0,0866
Homogêneo 30	19,6820	0,7307	0,0960	0,0866
Homogêneo 40	19,6747	0,6710	0,0908	0,0820
Homogêneo 48	19,6775	0,6682	0,0897	0,0829

No gráfico da Figura 4.20 verificou-se que as oscilações no raio da esfera não são significativas enquanto o desvio máximo da superfície aumenta em todos os casos, sendo este aumento superior na utilização de filtros adaptativos. Com a utilização do reconhecimento esférico, o desvio padrão diminuiu em todos os casos e o desvio médio também diminuiu, no entanto com maior intensidade.

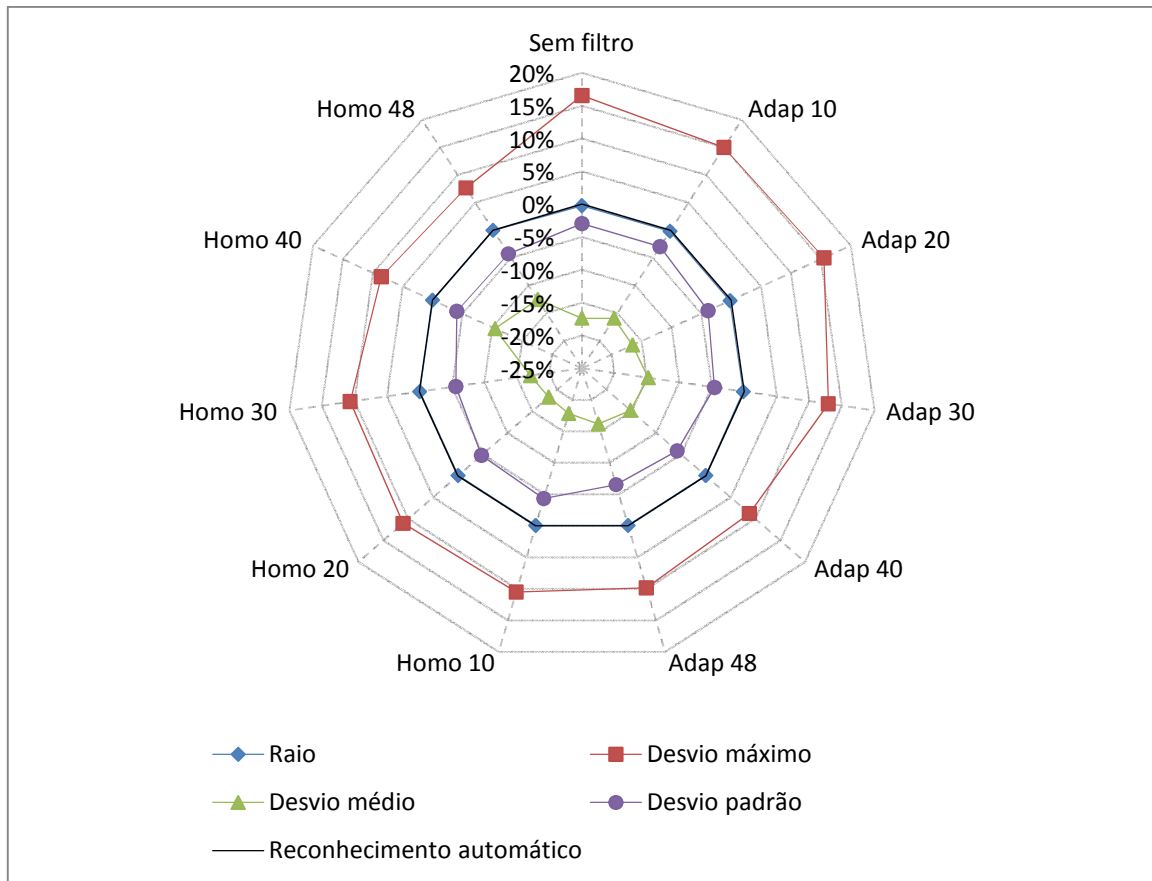


Figura 4.20: Análise da utilização do reconhecimento esférico em relação ao automático

#### Análise da utilização de reconhecimento esférico

O facto de ser utilizado o reconhecimento esférico em detrimento do automático, leva a que o software faça uma aproximação mais precisa à nuvem de pontos. Desta forma, o desvio médio e o desvio padrão diminuem enquanto a distância aos pontos mais afastados da distribuição média da nuvem é maior levando ao aumento do desvio máximo.

#### 4.5.3 Suavização de formas regulares

Os gráficos seguintes apresentam o estudo do efeito de suavização de formas regulares. Uma vez que os resultados nas três malhas estudadas (malha sem filtro, filtro homogêneo 10% e adaptativo 10%) são muito idênticos, tanto no modelo da esfera (Figura 4.19) como do plano (Figura 4.20), optou-se por apresentar apenas os resultados na malha sem filtro. Os restantes gráficos podem ser consultados no Anexo III.

A Tabela 4-17 apresenta os dados dos modelos não suavizados da esfera e do plano, que serviram de referência ao estudo de suavização.

Tabela 4-17: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados da esfera e do plano

Dados de referência				
Elemento	Raio	Desvio máximo	Desvio médio	Desvio padrão
Esfera	19,6392	0,8267	0,0887	0,0835
Plano	-	0,5211	0,1144	0,0886

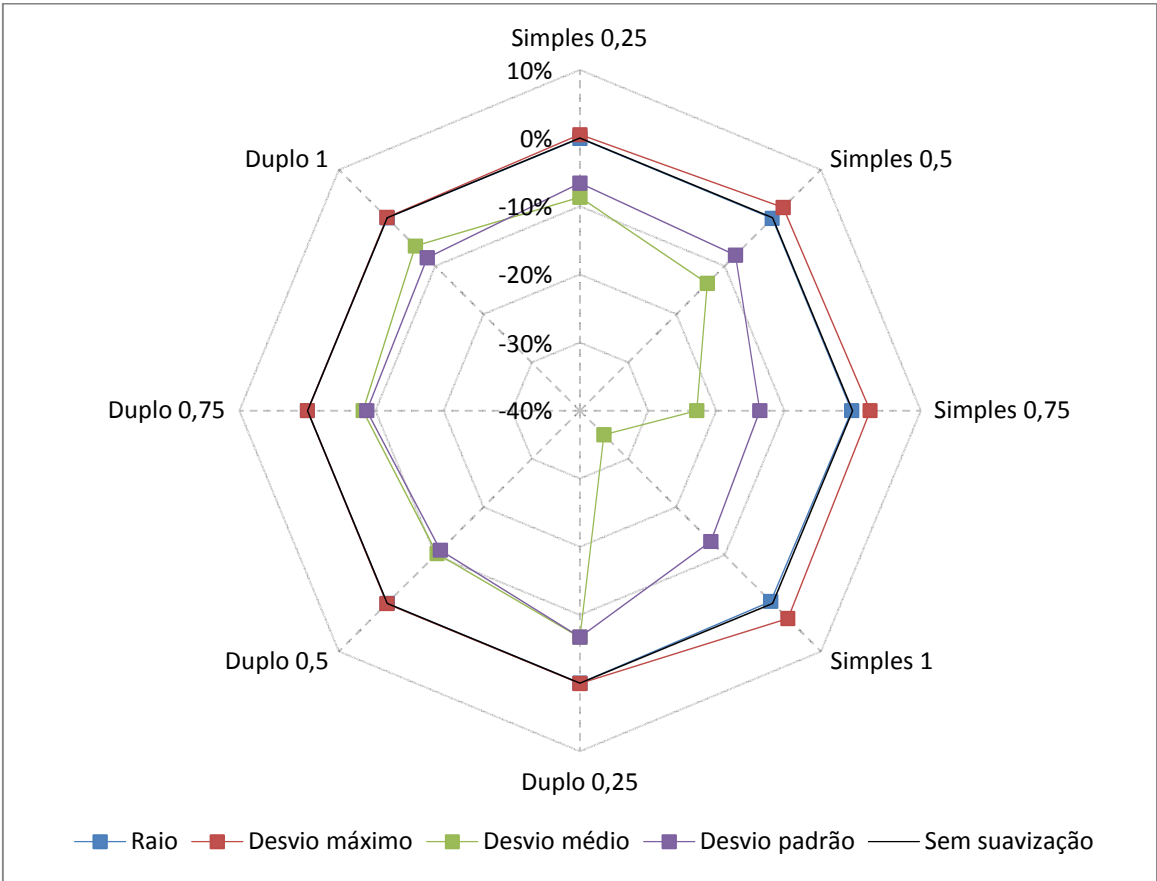


Figura 4.21: Análise do efeito de suavização da malha sem filtro do modelo esférico

Verificou-se que a utilização de filtro não provoca efeitos significativos no raio da esfera. No que diz respeito ao desvio máximo, observou-se um aumento muito ligeiro com o efeito de suavização simples. O desvio médio e o desvio padrão diminuem em todos os casos estudados, sendo esta diminuição mais acentuada na utilização do efeito de suavização simples.

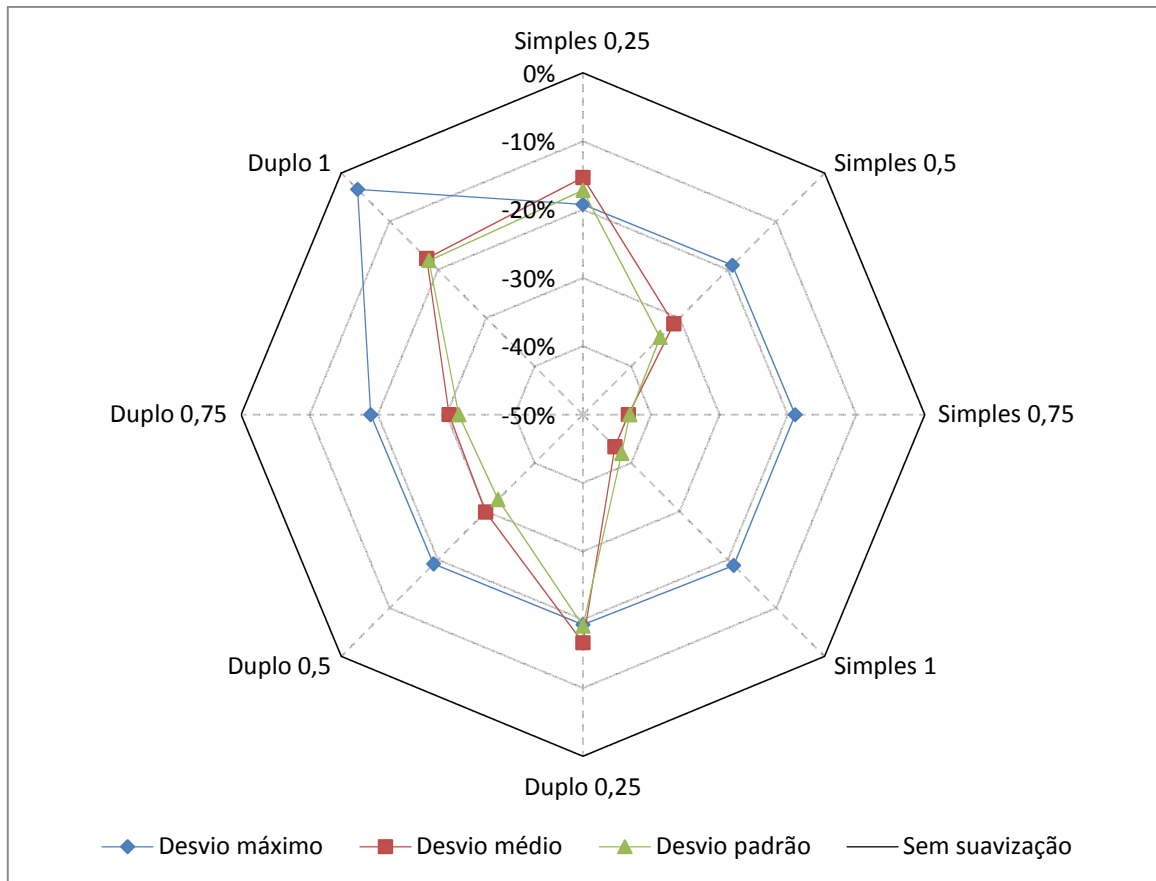


Figura 4.22: Análise do efeito de suavização na malha sem filtro do modelo plano

Em relação ao modelo plano, o desvio máximo é sempre menor com a utilização de suavização e é praticamente constante em todos os tipos utilizados. Também se verificou que o desvio médio da superfície e o desvio padrão são menores quando a malha é suavizada, sendo esta diminuição mais acentuada no efeito simples de suavização.

#### Análise da suavização de formas regulares

O facto de o efeito de suavização eliminar os raios mais pequenos e de tornar a malha mais uniforme torna o reconhecimento da malha mais preciso, diminuindo o desvio médio e o desvio padrão em ambos os casos e ainda o desvio máximo no modelo plano.

#### 4.5.4 Optimização de formas regulares

No estudo do efeito de optimização da malha de triângulos da esfera observaram-se resultados idênticos na malha sem filtro e na malha com filtro adaptativo, ambos com ligeiras diferenças em relação à malha com filtro homogêneo. Apesar de serem comentados todos os resultados, optou-se por apresentar apenas os resultados na malha sem filtro (Figura 4.23) de forma a não sobrecarregar o documento. No modelo do plano, o efeito de optimização também é idêntico nos três casos e optou-se novamente por apresentar apenas o gráfico da malha sem filtro (Figura 4.24). Os restantes gráficos podem ser consultados no Anexo IV.

Na visualização dos resultados é necessário ter em conta que a optimização da malha implica que esta foi previamente suavizada.

A Tabela 4-18 apresenta os dados dos modelos não optimizados da esfera e do plano, que serviram de referência ao estudo de suavização. Tal como tinha sucedido com o estudo da optimização de formas irregulares, cada modelo optimizado é comparado individualmente com o respectivo modelo não optimizado e não em relação a apenas uma referência.

Tabela 4-18: Resultados da geração de superfícies dos modelos não optimizados da esfera e do plano

Dados de referência					
Tipo de suavização	Modelo	Raio (mm)	Desvio máximo (mm)	Desvio médio (mm)	Desvio padrão (mm)
Simples 0,25	Esfera	19,628	0,8408	0,0816	0,0783
	Plano	-	0,437	0,0992	0,0756
Simples 0,5	Esfera	19,6171	0,8546	0,0781	0,0775
	Plano	-	0,4376	0,0872	0,0661
Simples 0,75	Esfera	19,6145	0,868	0,0722	0,0735
	Plano	-	0,4381	0,0798	0,0619
Simples 1	Esfera	19,5596	0,9267	0,0657	0,074
	Plano	-	0,4387	0,0798	0,0624
Duplo 0,25	Esfera	19,6388	0,827	0,0831	0,0782
	Plano	-	0,437	0,0981	0,0744
Duplo 0,5	Esfera	19,6385	0,8272	0,0804	0,0752
	Plano	-	0,4375	0,0881	0,0669
Duplo 0,75	Esfera	19,6392	0,8267	0,0887	0,0768
	Plano	-	0,438	0,0877	0,0672
Duplo 1	Esfera	19,6382	0,8274	0,0838	0,0771
	Plano	-	0,5041	0,0972	0,075

Em relação ao gráfico da Figura 4.23, observou-se que o raio da esfera não sofre alterações com a utilização do efeito de optimização da malha. O desvio máximo diminui de igual forma em todos os casos enquanto o desvio médio diminui significativamente na utilização do efeito duplo de suavização. Também se observou uma diminuição ligeiramente mais acentuada com o efeito de suavização simples.

Relativamente à Figura 4.24, no modelo plano, o desvio máximo da superfície sofre uma diminuição relativamente constante, entre 1 e 3%, em todos os casos os tipos de suavização estudados. No desvio médio também se verificou uma diminuição em todos os casos, no entanto mais acentuada na utilização do efeito duplo de suavização. Dos três desvios estudados, o desvio padrão é aquele que sofre a maior diminuição, entre os 6 e os 12%.

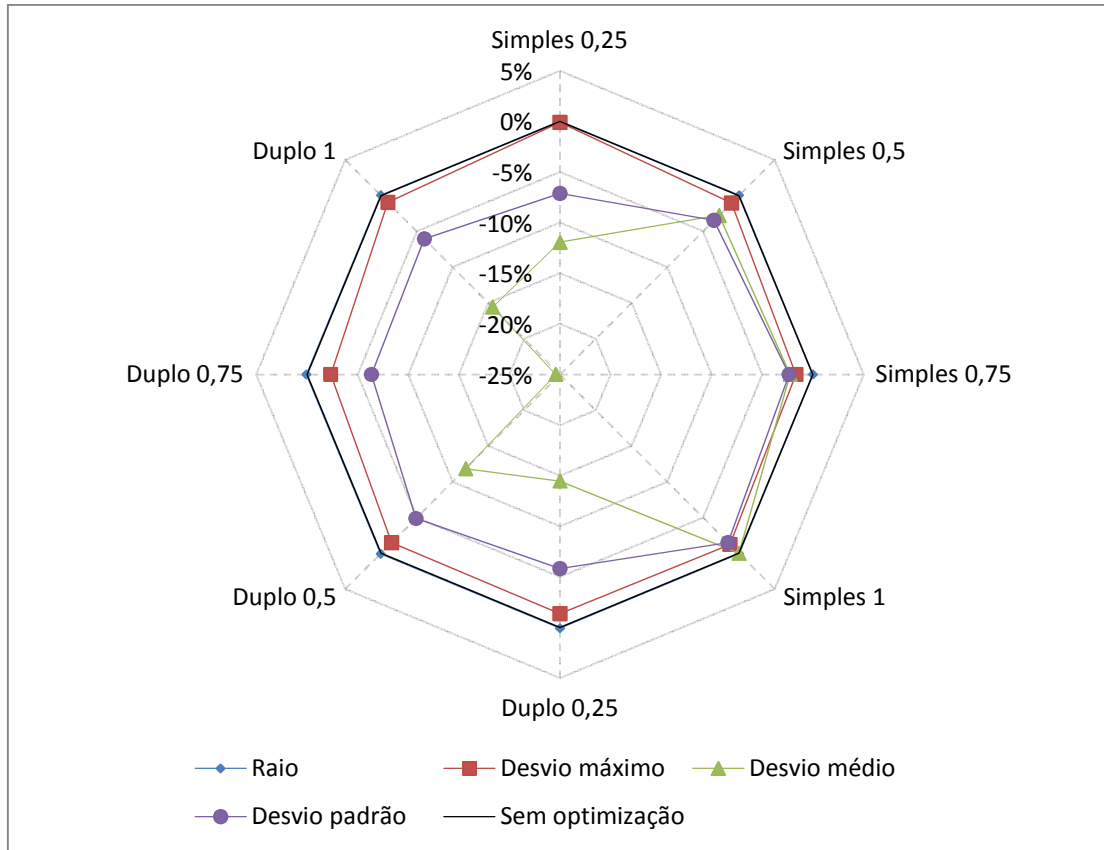


Figura 4.23: Análise do efeito de otimização na malha sem filtro do modelo esférico

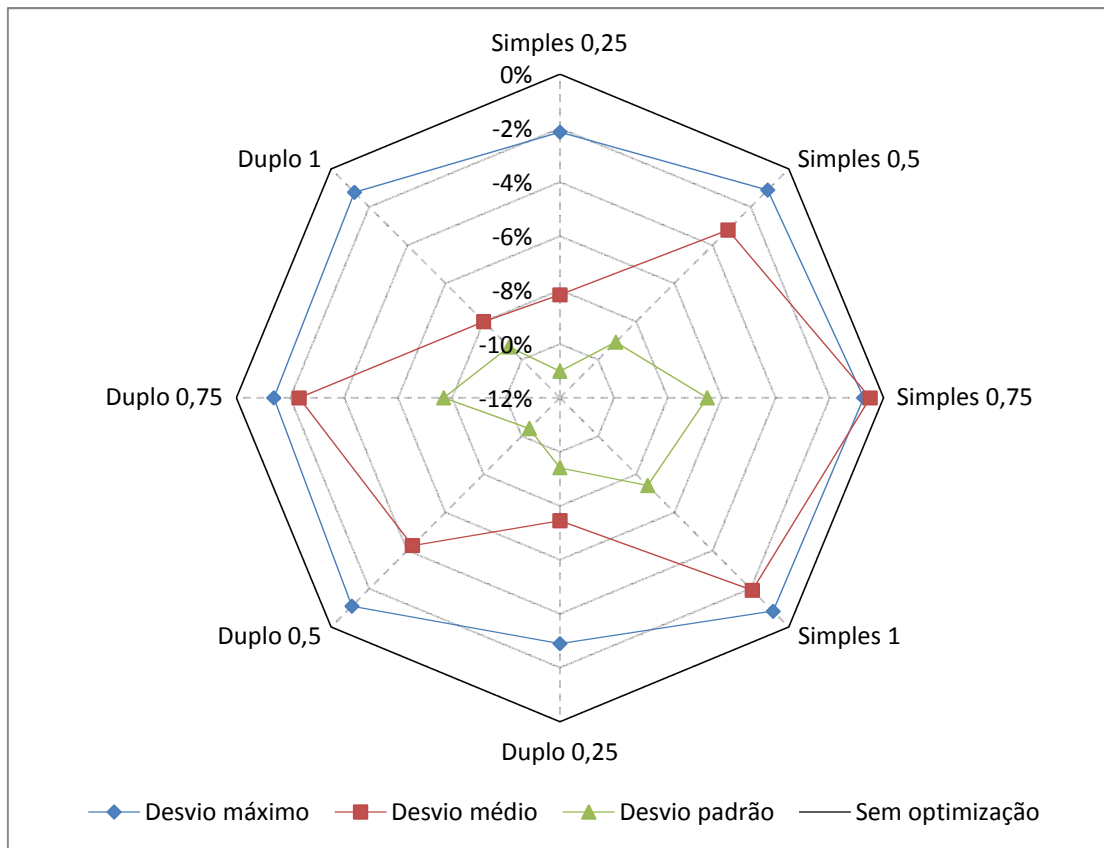


Figura 4.24: Análise do efeito de otimização da malha sem filtro do modelo plano

### **Análise da otimização de formas regulares**

Nos três desvios analisados no modelo da esfera verificaram-se diminuições mais acentuadas na malha sem filtro e na malha com filtro adaptativo uma vez que são as malhas mais desorganizadas e a otimização provocou maior efeito em relação à utilização de filtro homogêneo. No primeiro caso porque não foi aplicado qualquer filtro e no segundo porque o filtro utilizado deu origem a espaços sem pontos levando à desorganização da malha. No que diz respeito ao modelo plano, a diminuição dos desvios foi um pouco mais intensa com o efeito duplo de suavização uma vez que este provocou uma maior desorganização da malha de triângulos e por esse motivo a sua otimização revelou-se mais importante.

## **4.6 Conclusões sobre o estudo realizado no software CATIA**

Através dos estudos realizados foi possível perceber qual a melhor forma de obter superfícies através de uma nuvens de pontos, tanto em formas irregulares, no caso da mandíbula, como em formas regulares, no caso das esferas e dos planos. Os módulos utilizados, *Digitized Shape Editor* e *Quick Surface Reconstruction*, permitiram constatar que o CATIA V5 é um software bastante versátil e com uma vasta lista de comandos disponíveis para a obtenção de superfícies a partir de nuvens de pontos. A quantidade de parâmetros que cada comando permite manipular na sua utilização deixou transparecer o elevado grau de rigor que o utilizador pode auferir na obtenção do resultado desejado.

Na obtenção de superfícies de formas irregulares a importância da utilização de filtro foi notória na diminuição do desvio máximo da superfície enquanto a variação dos restantes parâmetros foi pouco significativa. Também foi possível concluir que a utilização de filtros adaptativos, pelo facto de actuar com mais intensidade em áreas planas, pode retirar informação necessária nos casos em que o nível de detalhe exigido seja muito elevado, como são os modelos anatómicos. Nos modelos de formas regulares a utilização de filtro não teve um efeito tão expressivo, no entanto foi possível perceber que as formas esféricas devem ser filtradas homogeneamente enquanto as formas planas devem ser alvo de um filtro adaptativo

A suavização da malha de triângulos revelou-se um passo fundamental na obtenção de superfícies com elevado grau de detalhe uma vez que em todos os casos, com menor ou maior intensidade, se verificou a diminuição do desvio médio, e também do desvio padrão nas formas regulares, o que significa uma aproximação mais precisa da superfície à geometria da malha. Com o modelo da mandíbula filtrado homogeneamente a maior parte dos elementos pontiagudos foram removidos e o efeito de suavização simples apresenta aos melhores resultados. Nas malhas provenientes da nuvem sem filtro e da nuvem com filtro adaptativo, uma vez que a globalidade dos pontos mais afastados da nuvem não foi eficazmente retirada, o tipo de suavização com melhores resultados foi de efeito duplo uma vez que reduz a distância aos vértices mais afastados. A suavização de formas regulares não deu origem a melhoras tão expressivas mas ainda assim foi possível verificar a diminuição do desvio médio e desvio padrão em todos os modelos estudados com melhores resultados no efeito simples de intensidade máxima.

No entanto, as escolhas do tipo de suavização a utilizar estão dependentes dos resultados da sua optimização porque a malha suavizada não tem o efeito desejado se esta não for posteriormente optimizada. Uma vez que os vértices da malha sofreram mudanças de posição, é necessário fazer uma reestruturação dos triângulos através do processo de optimização. Foi possível verificar que a optimização tem efeitos idênticos quando é utilizado o mesmo coeficiente independentemente do tipo de suavização. No modelo de formas irregulares, os efeitos mais notórios da optimização ocorreram na malha sem utilização de filtro e com filtro adaptativo que eram à partida provenientes das nuvens mais desorganizadas. Na esfera e no plano, apesar de numa percentagem mais reduzida, a optimização também melhorou a qualidade final da superfície devido às formas mais organizadas destes dois modelos.

Nas três malhas analisadas do modelo da mandíbula verificou-se que o aumento da resolução da superfície teve efeitos semelhantes. Se a resolução for entendida como o nível de detalhe da superfície e que neste caso a resolução máxima seria igual ao número de triângulos, facilmente se percebe que o seu aumento dá origem a melhores resultados. No caso de o número de faces ser igual ao número de triângulos a superfície seria uma representação fiel da malha, no entanto o valor atribuído à resolução não é alcançável e apenas funciona como um alvo a atingir. Com a resolução máxima foi possível obter diminuições do desvio médio entre os 200 e 400% nos modelos testados.

Finalmente, o último estudo realizado na geração de superfícies de formas irregulares foi a diminuição do *desvio médio limite* como parâmetro na obtenção da superfície. Ao contrário da *resolução da superfície*, este parâmetro não funciona como um alvo atingir mas sim como um limite máximo, o que não significa que não possa ser excedido. A manipulação deste parâmetro também se mostrou essencial uma vez que com o limite fixado em 0.1 mm foi possível obter reduções do desvio médio entre 500% e 1000% nos modelos estudados.

Na geração de superfície da esfera e do plano, foi utilizado o reconhecimento geométrico automático e manual, da malha de triângulos. No plano, os tipo de reconhecimento utilizados, automático e planar, deram origem a resultados iguais devido à forma elementar do plano. Na esfera a utilização do reconhecimento esférico é claramente mais favorável como se pode observar na diminuição do desvio médio e do desvio padrão.

A Tabela 4-19 apresenta as características estudadas que reproduzem com máxima precisão os modelos originais da mandíbula, esferas e planos. Apesar de não ser visível na tabela, todas as malhas de triângulos dos modelos apresentados foram optimizadas.

Tabela 4-19: Características dos modelos finais utilizados no CATIA

Modelo	Tipo de Filtro	Pontos Filtrados	Tipo de Suavização	Resolução da Superfície	Desvio Méd. Limite (mm)	Reconhecimento Geométrico
Mandíbula	Homogéneo	10%	Simples 1	5000	0,1	-
Esfera	Homogéneo	10%	Simples 1	-	-	Esférico
Plano	Adaptativo	10%	Simples 1	-	-	Planar



## 5 ESTUDO REALIZADO COM O SOFTWARE SOLIDWORKS

### 5.1 Estudo realizado

Tal como no estudo realizado com o software CATIA, as diferentes formas foram isoladas com o intuito de realizar uma análise personalizada de cada geometria. O método de tratamento da nuvem de pontos e da malha de triângulos foi realizado de igual forma em todos os modelos, enquanto na geração da superfície foram utilizados métodos diferentes nas superfícies de formas irregulares e regulares.

#### 5.1.1 Apresentação dos resultados

Neste caso optou-se por apresentar alguns resultados em *gráficos de barras* e outros em *gráficos radar*. Nos casos em o número de modelos analisados é menor ou igual a quatro foram utilizados gráficos de barras para uma melhor visualização dos resultados. Mais uma vez realizou-se uma análise comparativa dos comandos utilizados em cada estudo, no qual se pretendeu mostrar o seu efeito em relação ao comando por defeito. No final de cada estudo os resultados observados nos gráficos são comentados e de seguida é feita a sua análise.

#### 5.1.2 Metodologia

Inicialmente os pontos mais afastados (*outliers*) foram retirados manualmente e para remover o restante ruído foi utilizado o comando próprio para esse efeito. Neste comando o software disponibilizou uma gama de percentagens de remoção de pontos diferente para cada modelo: redução de pontos de 1 a 11% no modelo de formas irregulares, de 10 a 12% nas esferas e de aproximadamente 3% no plano. Antes da criação da malha é possível fazer uma simplificação da nuvem de pontos por variação da percentagem de simplificação e segundo quatro tipos diferentes: simplificação em curva, aleatória, uniforme ou híbrida. A simplificação apenas é utilizada em nuvens de pontos de grande dimensão e por esse motivo não foi testada nos modelos esféricos e planos. Depois do tratamento da nuvem de pontos o passo seguinte foi a

criação da malha, um processo completamente automático que não abrange qualquer parâmetro que permita alterar a forma de como a malha será gerada. Depois de se obter a malha, procedeu-se à suavização do modelo e neste caso existe apenas um tipo de suavização e esta permite alterar a sua intensidade numa escala de 1 a 10.

Na geração da superfície, o software SolidWorks permite criar a superfície de forma automática, no qual a superfície se adapta à forma da malha, ou através de um processo manual de segmentação da malha de triângulos e geração de entidades geométricas afins. Nas formas irregulares a malha foi gerada automaticamente enquanto nas formas regulares utilizou-se um processo manual, idêntico ao software CATIA, em que a superfície é gerada através do reconhecimento da forma da malha de triângulos. Tal como no CATIA, o procedimento adoptado, esquematizado na Figura 5.1, está dividido em três fases:

**1ª fase:** manipulação e tratamento da nuvem de pontos

**2ª fase:** criação e tratamento da malha de triângulos

**3ª fase:** geração da superfície

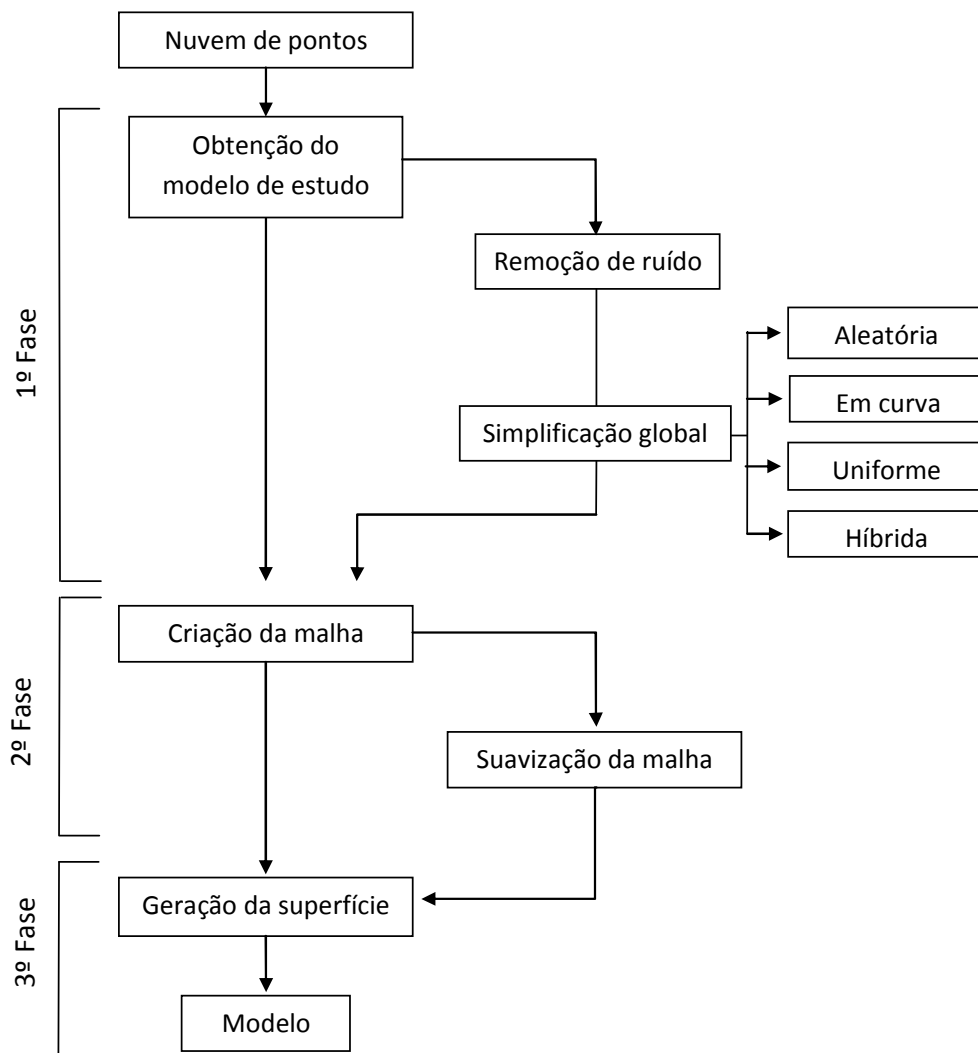


Figura 5.1: Procedimento para a geração de superfície no SolidWorks

## 5.2 Definição dos comandos utilizados

De seguida pretende-se explicar qual a função e o efeito de cada comando utilizado em todo o processo, desde o tratamento da nuvem de pontos até à geração da superfície.

### 5.2.1 Tratamento da nuvem de pontos

De forma a facilitar a manipulação da nuvem de pontos, esta deve ser sujeita a vários tipos de tratamento. O software SolidWorks permite a utilização de dois métodos distintos: remoção do ruído com o comando *noise removal* e simplificação da nuvem de pontos com o comando *global simplification*. Na remoção do ruído a nuvem é dividida em partições e os pontos que estão fora da distribuição média são removidos, resultando na eliminação de ruído. A simplificação global da nuvem de pontos reduz o número de vértices no caso da criação de uma malha de triângulos ou reduz o número de pontos dando origem a um ficheiro ‘menos pesado’. Este procedimento é geralmente utilizado quando a nuvem de pontos é muito vasta e deve ser simplificada de forma a gerar uma malha mais eficiente (Tutorial-SolidWorks).

### 5.2.2 Criação da malha de triângulos

Como foi referido anteriormente, a criação da malha de triângulos é um processo completamente automático que não permite a manipulação de qualquer parâmetro. Além disso o único tratamento possível é a suavização da malha, o qual é aplicado posteriormente. A suavização ajuda a rectificar áreas irregulares e áreas não refinadas como se mostra na Figura 5.2: a) malha não suavizada e b) malha suavizada. É possível regular a sua intensidade numa escala de 1 a 10. A suavização pode ser do tipo global ou local, no entanto apenas foram feitas suavizações globais.

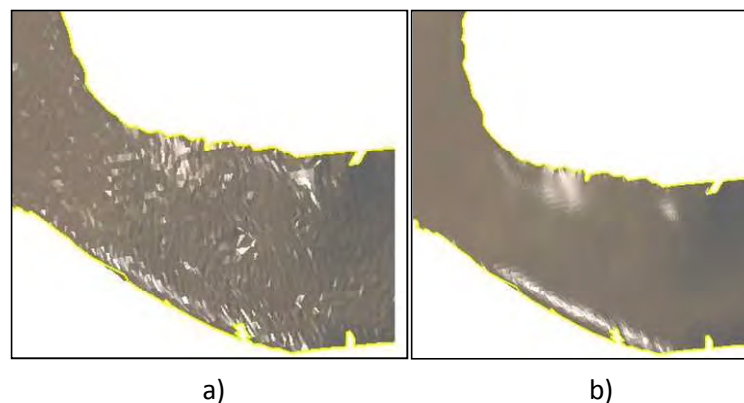


Figura 5.2: Suavização da malha de triângulos no SolidWorks: a) malha não suavizada e b) malha suavizada

### 5.2.3 Geração da superfície

Antes de escolher qual o tipo de geração de superfície que se pretende utilizar, manual ou automática, é possível escolher qual a resolução da superfície pretendida. Numa escala de 0 a 20 o software considera, por defeito, uma resolução de 10. Diminuindo essa resolução obtém-se

faces maiores e a superfície apresenta menos detalhe, enquanto o seu aumento, pelo contrário, dá origem a faces mais pequenas e naturalmente a superfície retém mais detalhes e apresenta maior precisão (Tutorial-SolidWorks). No modelo de formas irregulares foi utilizada a geração de superfície automática em que a superfície se adapta à forma existente, enquanto nas geometrias regulares o método utilizado para gerar a superfície foi o reconhecimento da forma geométrica da malha de triângulos onde o utilizador define a forma geométrica pretendida. As formas disponibilizadas pelo software são: plano, esfera, cilindro e cone. Ao contrário do CATIA, não é possível fazer um reconhecimento automático da forma geométrica.

A sequência do processo descrito no ponto 5.3 correspondente à criação de superfícies irregulares é apresentada nas imagens da Figura 5.3: a) nuvem de pontos, b) malha de triângulos e c) superfície sobreposta à malha.

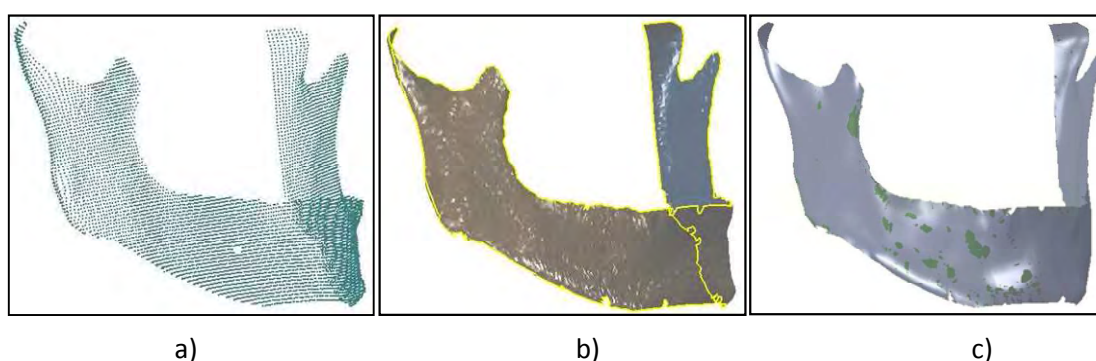


Figura 5.3: Processo de geração de superfícies no SolidWorks

### 5.3 Definição dos parâmetros analisados

Na geração de superfícies de formas irregulares, os parâmetros analisados foram: o número de faces, o desvio máximo, o desvio mínimo e o desvio padrão. O raio, o desvio padrão, o desvio máximo e o desvio mínimo foram os parâmetros estudados na geração de superfícies de formas regulares. As suas definições apresentam-se na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Definições dos parâmetros de análise no SolidWorks

Parâmetros de análise	Definição
Número de faces	Número de superfícies geradas através da malha de triângulos.
Desvio máximo	Máximo desvio positivo, medido entre a superfície e a malha de triângulos.
Desvio mínimo	Máximo desvio negativo, medido entre a superfície e a malha de triângulos.
Desvio padrão	Média das diferenças entre o valor de cada desvio e o desvio médio.
Raio	Distância do centro a um ponto qualquer da esfera.

Tal como sucedeu com o estudo realizado no software CATIA, os parâmetros de análise foram escolhidos com o intuito de avaliar a precisão com que a superfície se ajusta à malha de triângulos.

## 5.4 Estudo de formas irregulares

### 5.4.1 Resumo dos estudos realizados

Os gráficos deste capítulo apresentam os resultados do estudo realizado na geração de superfícies de formas irregulares. Inicialmente foi feita uma análise às percentagens de remoção de ruído permitidas pelo software e de seguida foram estudados os vários tipos de simplificação da nuvem de pontos em quatro percentagens diferentes: 10, 20, 30 e 40%. Depois de criada a malha de triângulos foi estudado o efeito de suavização da malha e finalmente estudou-se o único parâmetro existente na geração da superfície, a *resolução da superfície*. Na Tabela 5-2 apresenta-se de forma esquemática os estudos realizados.

Tabela 5-2: Resumo do estudo realizado nas formas irregulares

Estudo realizado	Modelo estudado	Parâmetros de análise
Remoção de ruído	Nuvem de pontos	Número de faces
Simplificação da nuvem		Desvio máximo
Suavização da malha	Malha de triângulos	Desvio mínimo
Aumento da resolução da superfície		Desvio padrão

### 5.4.2 Tratamento da nuvem de pontos

O gráfico da Figura 5.4 apresenta o estudo relativo à remoção de ruído da nuvem de pontos. O software apenas permitiu quatro níveis de remoção de ruído, entre 1 e 11% aproximadamente. Todos os resultados dizem respeito ao seu efeito em relação à nuvem de pontos inicial, com 9347 pontos.

Na Tabela 5-3 apresentam-se os resultados da geração de superfícies do modelo da mandíbula sem remoção de ruído. Estes dados serviram de referência para a análise dos resultados de cada nível de remoção de ruído testado.

Tabela 5-3: Resultados da geração de superfícies do modelo sem remoção de ruído

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
134	1,1497mm	-0,5222mm	0,0855mm

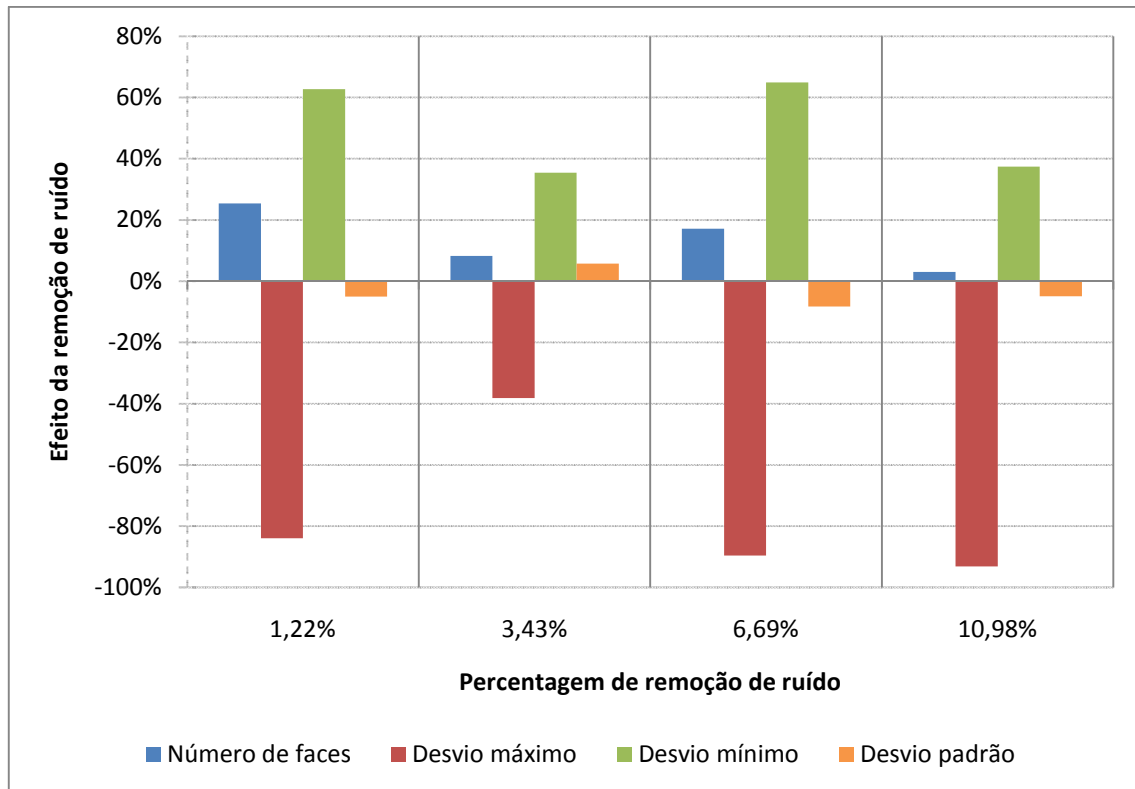


Figura 5.4: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial

Relativamente ao gráfico da Figura 5.4, verificou-se que o número de faces aumenta com a remoção de ruído, no entanto tende a diminuir com o aumento da percentagem de remoção. O desvio máximo também diminui significativamente quando é removido ruído à nuvem de pontos, ao contrário do desvio mínimo que aumenta sempre. A exceção da nuvem com 3,43% de remoção de ruído, o desvio padrão, ainda que numa percentagem muito reduzida, diminui em todos os casos.

#### Análise da remoção de ruído

O número de faces aumenta porque a redução do número de pontos e consequente diminuição do número de triângulos dá origem a uma malha mais grosseira e por esse motivo são necessárias mais faces para obter a superfície correspondente à malha. O desvio máximo diminui porque os pontos mais afastados foram removidos e desta forma a superfície adapta-se com mais facilidade à malha de triângulos dando origem à diminuição do desvio máximo. O facto de se verificar o aumento do desvio mínimo significa que a superfície foi gerada mais próxima dos vértices responsáveis pelos desvios máximos. O desvio padrão diminui quando a remoção de ruído tornou a malha mais uniforme, o que não foi o caso para 3,43% de pontos removidos.

#### 5.4.3 Simplificação da nuvem de pontos

Foram realizados estudos sobre quatro métodos de simplificação da nuvem de pontos: simplificação aleatória, em curva, uniforme e híbrida. De forma a não sobrecarregar o documento, apenas é apresentado o gráfico do método escolhido para simplificar a nuvem de pontos (simplificação em curva). No entanto, os restantes gráficos também são alvo de comentários e

posterior análise. Todos os resultados são apresentados em relação à nuvem de pontos sem utilização de qualquer tipo de simplificação e além disso não foi removido qualquer ruído para este estudo.

A Tabela 5-4 apresenta os resultados da geração de superfícies do modelo sem utilização de qualquer tipo de simplificação. Estes dados serviram de referência para a análise do efeito de simplificação em curva. Os resultados da sua utilização são apresentados na Figura 5.5.

Tabela 5-4: Resultados da geração de superfícies do modelo não simplificado

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
134	1,1497mm	-0,5222mm	0,0855mm

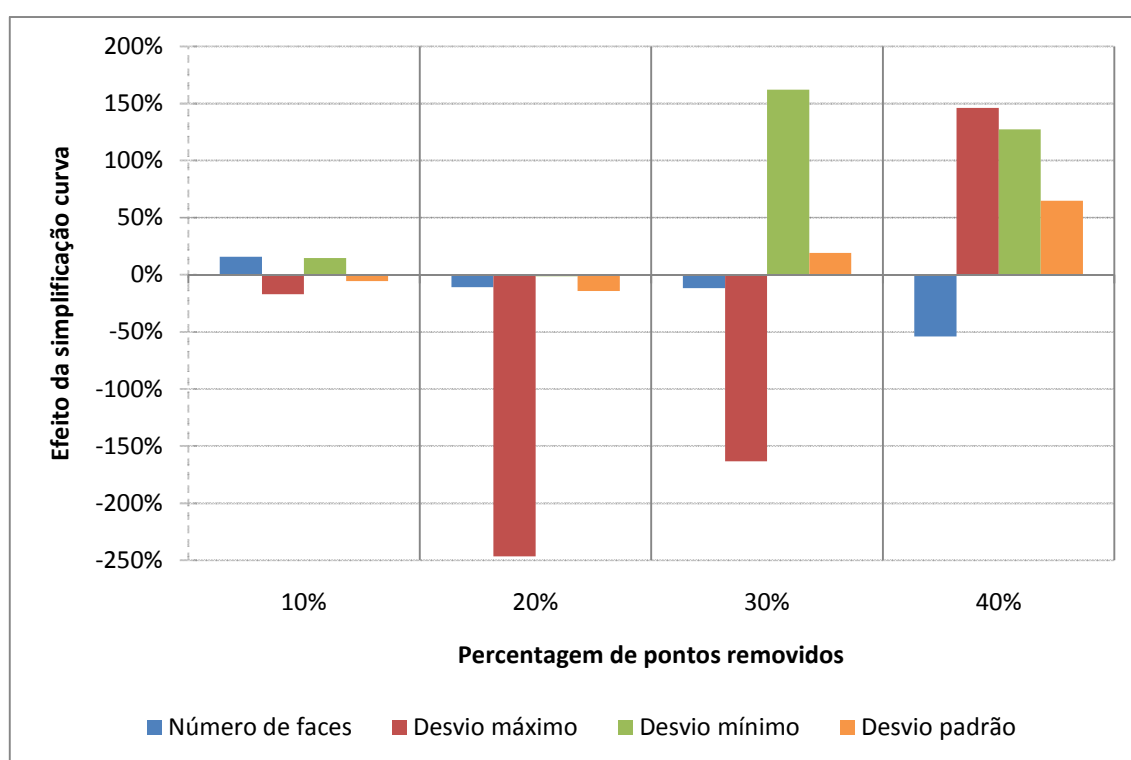


Figura 5.5: Análise da utilização de simplificação curva da nuvem de pontos inicial

Na simplificação em curva, à exceção de 10%, verificou-se que o número de faces diminui com o aumento do número de pontos removidos. O desvio máximo diminui para os modelos com simplificação de 10, 20 e 30%, no entanto aumenta para o dobro na simplificação mais intensa. O desvio mínimo praticamente não sofre alterações para as simplificações de 10 e 20% sendo que para 30 e 40% se verificou um aumento bastante acentuado. O desvio padrão sofre a diminuição mais intensa de todos tipos de simplificação para uma redução de pontos de 20%.

Os gráficos dos restantes tipos de simplificação encontram-se no Anexo V.

**Simplificação aleatória**

Observou-se que à exceção do modelo com simplificação de 10%, o número de faces diminui com o aumento da percentagem de remoção de pontos. O desvio máximo é sempre menor e sofre diminuições bruscas para os modelos com redução de 10 e 40% enquanto o desvio mínimo não segue nenhuma tendência. À exceção do modelo com redução de 10% dos pontos, verificou-se que o desvio padrão aumenta com a intensidade de simplificação.

**Simplificação uniforme**

Mantendo a tendência dos casos anteriores, o número de faces tem um ligeiro aumento no modelo com simplificação de 10% e nos restantes casos diminui. Os desvios máximo e mínimo sofrem oscilações ligeiras à exceção da simplificação de 30% em que o desvio máximo diminui mais de metade e o desvio mínimo aumenta mais do dobro. O desvio padrão mantém-se praticamente inalterável em todas as percentagens de simplificação.

**Simplificação híbrida**

Verificou-se que a diminuição do número de faces para se intensifica com o aumento do número de pontos removidos. O desvio máximo diminui e o desvio mínimo aumenta para 10 e 30% de simplificação e mantêm-se constantes com simplificação de 20%. O desvio padrão sofre oscilações muito ligeiras até 30% dos pontos removidos e para 40% verificou-se um aumento acentuado.

**Análise da simplificação da nuvem de pontos**

Como se pode observar nos gráficos dos quatro tipos de simplificação estudados, os resultados obtidos sofrem bastantes oscilações, todas elas sem qualquer tipo de critério. Este facto leva a que seja difícil tirar alguma conclusão em relação ao funcionamento deste comando. No entanto evidencia-se que a simplificação em curva de 20% permitiu obter os resultados mais satisfatórios uma vez que se observou a diminuição mais acentuada do desvio padrão e do desvio máximo, não tendo o desvio mínimo e o número de faces sofrido diferenças significativas.

**5.4.4 Suavização da malha de triângulos**

O gráfico da Figura 5.6 apresenta os resultados da utilização dos vários coeficientes de suavização, de 1 a 10. A análise foi feita em relação à malha não suavizada e na nuvem de pontos sem qualquer remoção de ruído. No entanto, os estudos de suavização na nuvem de pontos com remoção de ruído de 1.22 e 3.43% podem ser consultados no Anexo VI.

A Tabela 5-5 apresenta os resultados da geração de superfícies do modelo da mandíbula não suavizado. Os dados apresentados servem de comparação aos vários tipos de suavização testados.

Tabela 5-5: Resultados da geração de superfícies do modelo não suavizado

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
134	1,1497mm	-0,5222mm	0,0855mm



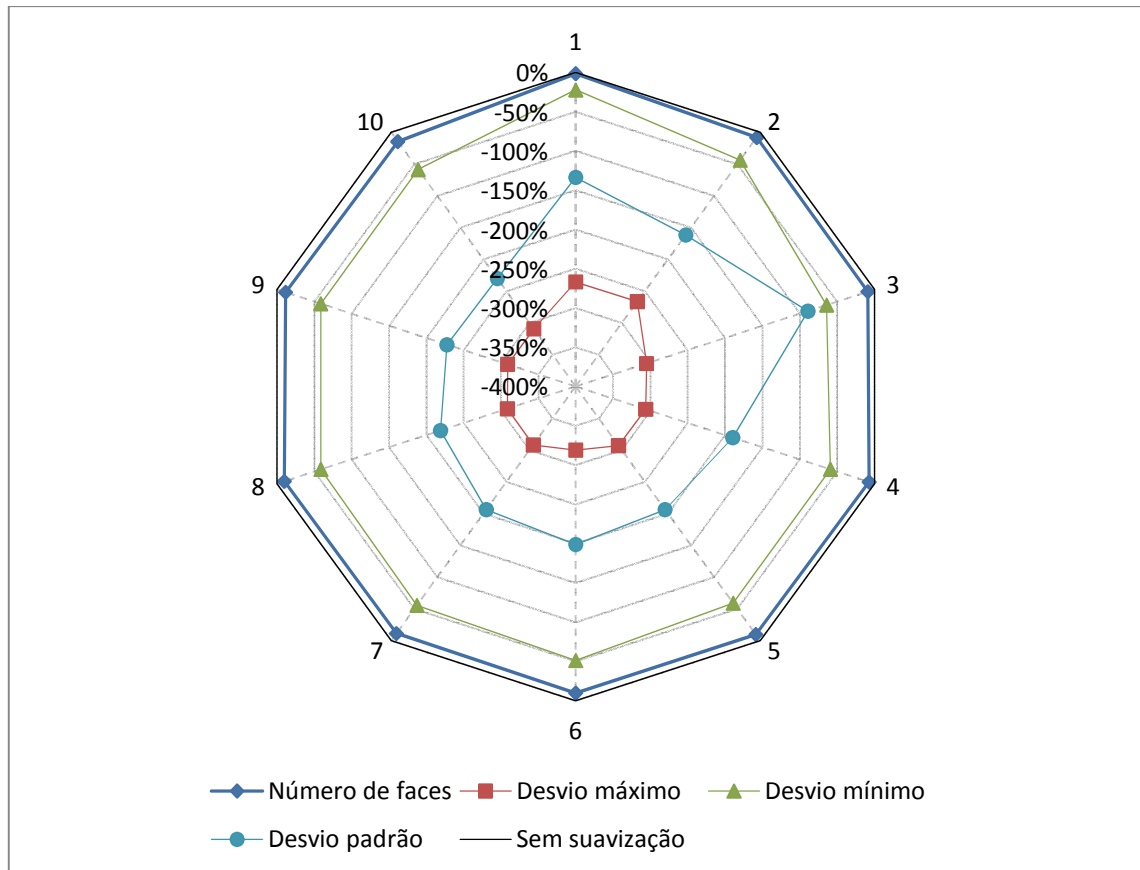


Figura 5.6: Análise do efeito de suavização na malha de triângulos

A suavização da malha provoca uma diminuição do número de faces, que apesar de ligeira, intensifica-se com o aumento do coeficiente de suavização atingindo um máximo de 15%. A diminuição desvio máximo e mínimo intensifica-se com o aumento do coeficiente, no entanto a diminuição do desvio máximo é muito mais intensa. Tendo observado uma diminuição máxima de 300% com o coeficiente de suavização 10, o desvio padrão segue a mesma tendência do desvio máximo e mínimo.

#### Análise da suavização da malha de triângulos

O facto de se ter verificado uma diminuição ligeira do número de faces com o coeficiente, pode significar que a suavização criou mais áreas planas na malha reduzindo assim o número de faces. O efeito mais notório da suavização foi na diminuição dos desvios. O reajuste dos vértices permitiu a rectificação das áreas irregulares facilitando a adaptação da superfície à malha de triângulos. A formação de uma malha mais uniforme permitiu também a diminuição do desvio padrão.

### 5.4.5 Resolução da superfície

Os resultados do aumento da resolução da superfície na malha sem remoção de ruído são apresentados na Figura 5.7. O software permite utilizar todas as unidades de 0 a 20, no entanto apenas foram testados cinco níveis de resolução. As percentagens dizem respeito ao efeito da resolução em relação ao valor mínimo, ou seja, aumento da resolução igual a zero. A evolução do número de faces não é apresentada devido ao elevado valor que atinge, no entanto esse valor é comentado de seguida. Os estudos de suavização nas malhas com remoção de ruído de 1,22% e 3,43% de podem ser consultados no Anexo VII.

A Tabela 5-5 apresenta os dados relativos à geração de superfícies do modelo da mandíbula com resolução 0. Estes dados servem de comparação à geração de superfícies de modelos com resolução superior (Figura 5.7).

Tabela 5-6: Resultados da geração de superfícies do modelo com resolução 0

Dados de referência			
Número de faces	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
106	1,0317mm	-1,0254mm	0,1112mm

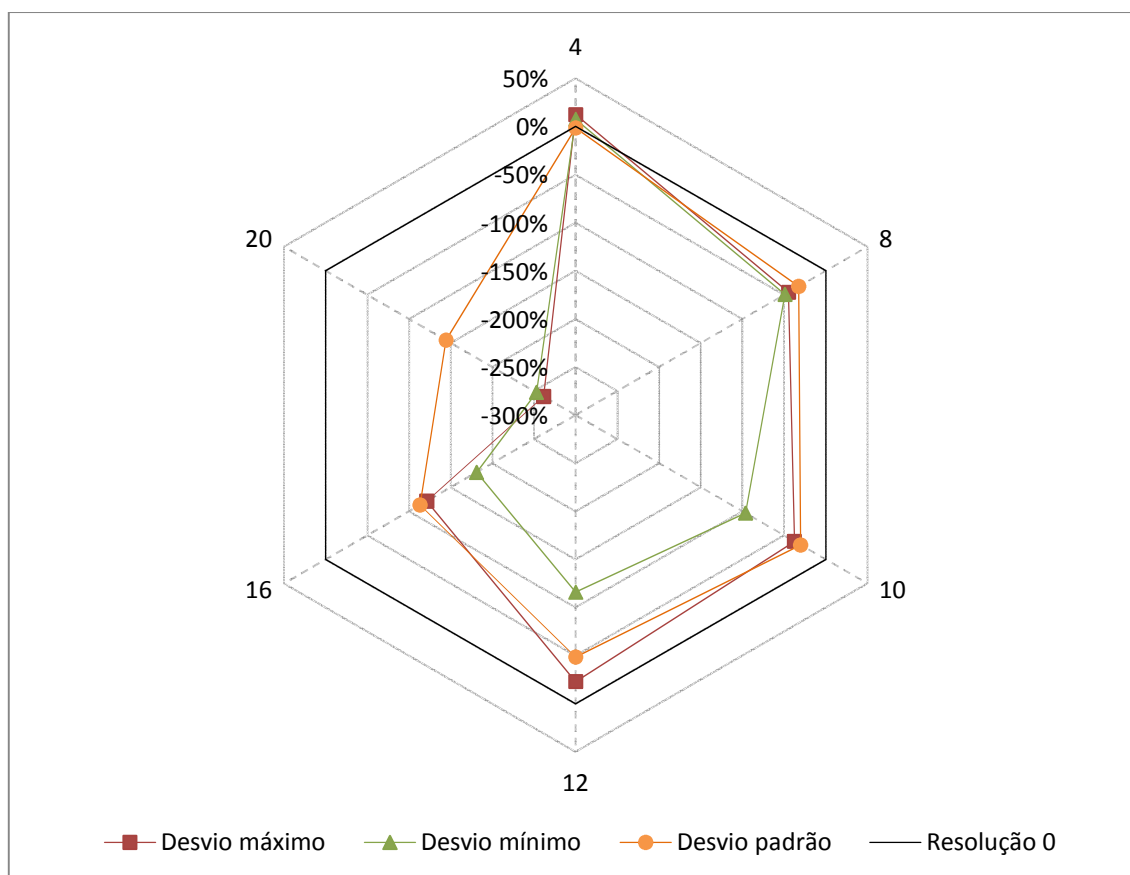


Figura 5.7: Análise do aumento da resolução da superfície

Relativamente ao gráfico da Figura 5.7, o número de faces aumenta drasticamente entre o coeficiente 12 e 20, onde se verificaram aumentos de 85, 530 e 1520% para os coeficientes de 12, 16 e 20 respectivamente. No que diz respeito aos desvios máximo e mínimo e ao desvio padrão, verificou-se uma diminuição gradual de todos eles com o aumento da resolução da superfície.

#### **Análise do aumento da resolução da superfície**

A resolução elevada implica o aumento do detalhe da superfície e por esse motivo verificou-se um maior número de faces. Uma vez que o número de faces aumenta substancialmente, a adaptação das mesmas à malha de triângulos é mais precisa dando origem a menores desvios da superfície em relação à malha. Este facto também levou à geração de uma superfície mais uniforme e consequente diminuição do desvio padrão.

## **5.5 Resultados e análise da geração de superfícies de formas regulares**

### **5.5.1 Resumo do estudo realizado**

A Tabela 5-7 apresenta um resumo do estudo da remoção de ruído e da suavização da malha nos modelos de formas regulares. Neste caso não foi realizada a simplificação da nuvem uma vez que apenas se aplica a nuvens com uma quantidade significativa de pontos, o que foi o caso.

Tabela 5-7: Resumo do estudo realizado nas formas regulares: esfera e plano

<b>Estudo realizado</b>	<b>Modelo estudado</b>	<b>Parâmetros de análise</b>
Efeito da remoção de ruído	Nuvem de pontos	Raio*
		Desvio máximo
Efeito de suavização	Malha de triângulos	Desvio mínimo
		Desvio padrão

### **5.5.2 Remoção de ruído em formas regulares**

Apresentam-se de seguida os resultados relativos ao estudo dos vários níveis de remoção de ruído permitidos pelo software no modelo esférico (10.35%, 11.42% e 11.71%) e no modelo plano (2.95% e 3.18%). Em ambos os casos a amplitude de percentagens de remoção é muito reduzida, 1.5% na esfera e 0.2% no plano aproximadamente. Inicialmente, a nuvem de pontos da esfera é composta por 1717 pontos enquanto a do plano tem 1782 pontos.

A Tabela 5-8 apresenta os dados relativos à geração de superfícies da esfera e do plano, sem remoção de ruído. Os resultados obtidos serviram de referência ao estudo apresentado nos gráficos das Figuras 5.8 e 5.9, do modelo da esfera e do plano, respectivamente.

Tabela 5-8: Resultados da geração de superfícies da esfera e do plano sem remoção de ruído

Dados de referência				
Modelo	Raio	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
Esfera	19,7570mm	0,7442mm	0,6715mm	0,1641mm
Plano	-	0,5993mm	0,4528mm	0,1464mm

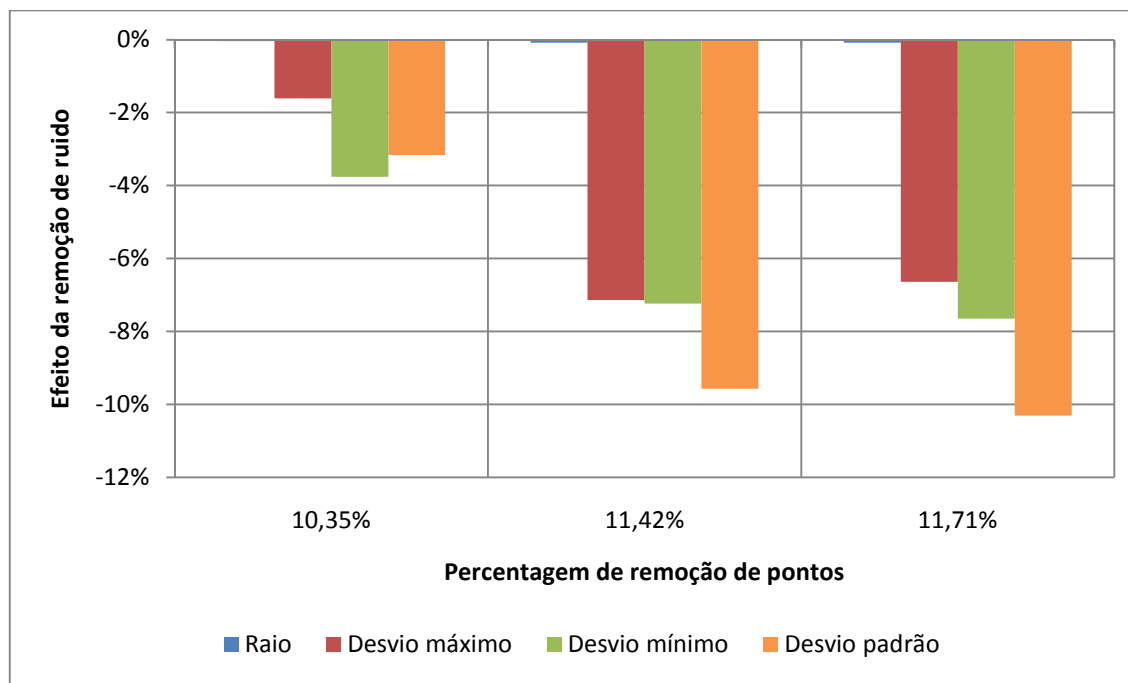


Figura 5.8: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial da esfera

No gráfico da Figura 5.8 observou-se que o raio da esfera se mantém praticamente inalterável com a remoção de ruído. Também foi possível verificar que todos os desvios (desvio máximo, desvio mínimo e desvio padrão) diminuem com o aumento da remoção de pontos.

Em relação ao modelo do plano (Figura 5.9), os desvios máximo e mínimo diminuem de igual forma independentemente da quantidade de ruído removido enquanto o desvio padrão, além de ser menor quando se recorre à remoção do ruído, sofre uma diminuição mais intensa com o aumento do número de pontos removidos.

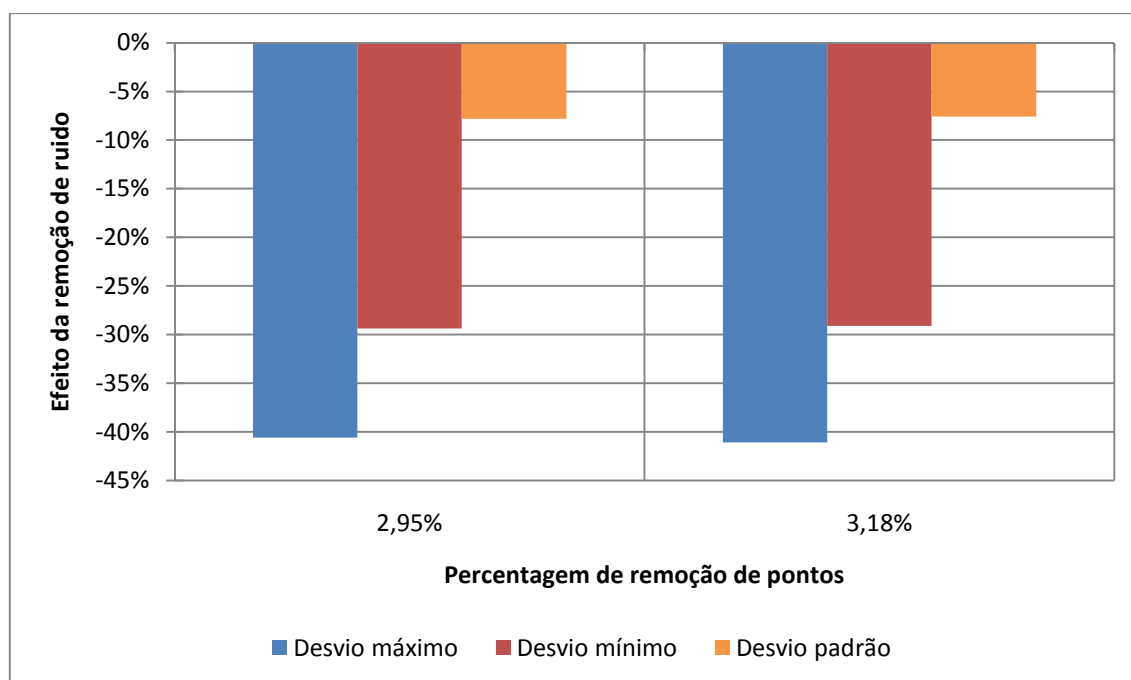


Figura 5.9: Análise da remoção de ruído da nuvem de pontos inicial do plano

### Análise da remoção de ruído

Mais uma vez a remoção do ruído levou à eliminação dos pontos mais afastados da nuvem e consequentemente foi criada uma malha mais uniforme. Desta forma, a superfície gerada adaptou-se com mais precisão à malha de triângulos levando à diminuição dos maiores desvios. O facto de os maiores desvios terem sido eliminados e os restantes de alguma forma uniformizados, também originou a diminuição do desvio padrão.

### 5.5.3 Suavização de formas regulares

Tal como sucedeu com as formas irregulares, os estudos de suavização da esfera (Figura 5.10) e do plano (Figura 5.11) foram realizados com as dez intensidades permitidas pelo software, de 1 a 10. Os resultados são apresentados em relação à malha não suavizada.

Na Tabela 5-9 são apresentados os resultados da geração de superfícies não suavizadas do modelo da esfera e do plano que serviram de referência ao estudo do efeito de suavização.

Tabela 5-9: Resultados da geração de superfícies dos modelos não suavizados da esfera e do plano

Dados de referência				
Modelo	Raio	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio padrão
Esfera	19,757mm	0,7442mm	0,6715mm	0,1641mm
Plano	-	0,5993mm	0,4528mm	0,1464mm

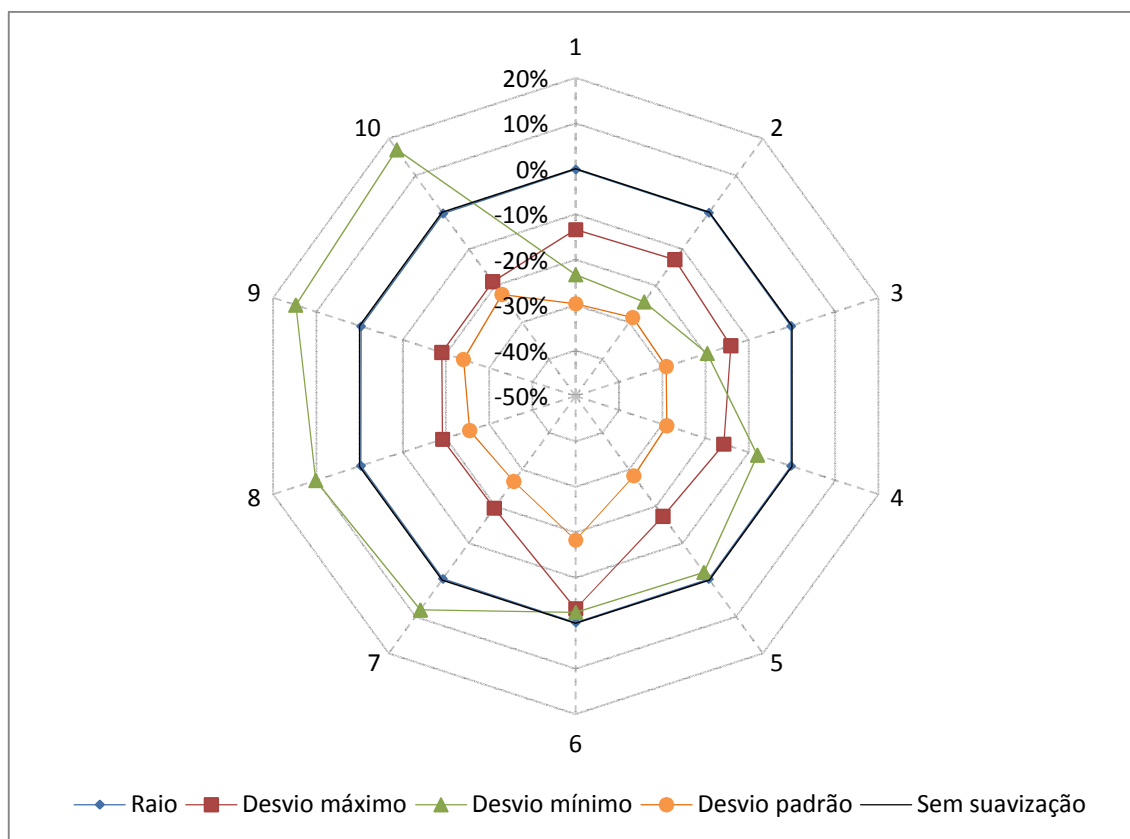


Figura 5.10: Análise do efeito dos vários coeficientes de suavização na malha de triângulos da esfera

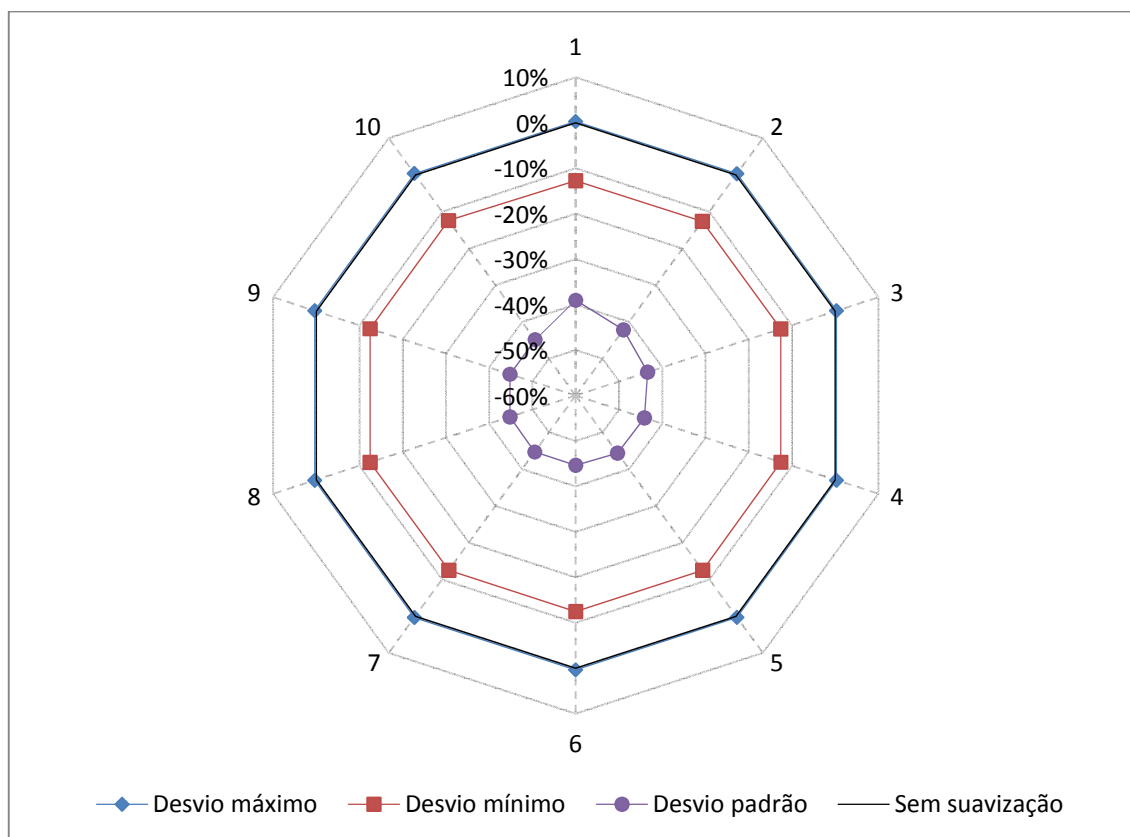


Figura 5.11: Análise do efeito dos vários coeficientes de suavização na malha de triângulos do plano

O raio da esfera não sofre alterações para nenhum coeficiente de suavização. O desvio máximo é sempre menor na malha suavizada. No entanto, com o aumento do coeficiente de suavização verificou-se que esta diminuição é cada vez menos acentuada. O desvio mínimo apenas diminui com na malha suavizada até ao coeficiente 6. Também se observou que o desvio padrão é sempre menor na malha suavizada e além disso, esta diminuição abranda com o aumento do coeficiente.

No plano, observou-se que desvio máximo não se altera enquanto o desvio mínimo sofre uma diminuição na ordem dos 12,5% em todos os coeficientes. O desvio padrão é sempre menor na malha suavizada e a diminuição acentua-se com o aumento do coeficiente atingindo uma diminuição máxima de 45% em relação à malha não suavizada.

#### **Análise da suavização de formas regulares**

Em ambos os casos, esfera e plano, observou-se uma diminuição significativa do desvio padrão. Como já foi referido várias vezes, a suavização torna a malha mais uniforme levando a que a adaptação da superfície seja mais precisa. A diminuição gradual do desvio máximo e o aumento, também ele gradual, do desvio mínimo na esfera, deve-se ao facto de a geração da superfície se deslocar no sentido dos vértices mais afastados para o lado positivo com o aumento do coeficiente de suavização. No modelo do plano essa deslocação não se verificou uma vez que o desvio máximo não se altera e o desvio mínimo, apesar de menor na malha suavizada, é sempre constante.

### **5.6 Conclusões sobre o estudo realizado no software SolidWorks**

No SolidWorks, os estudos realizados permitiram perceber qual o melhor método para obter uma superfície com boa qualidade em formas irregulares e regulares. Nesta aplicação, todo o procedimento que conduz à geração final de superfícies é completamente diferente do procedimento adoptado no software CATIA. Através do *Mesh Prep Wizard* do módulo *ScanTo3D*, o utilizador é obrigado a seguir a sequência sugerida pelo software, apenas com a opção de poder utilizar alguns dos comandos disponibilizados.

Analizando o tratamento da nuvem de pontos, pode-se referir que a diminuição do desvio padrão no modelo de formas irregulares permitiu realçar a importância da remoção do ruído. Também foi possível perceber que a remoção de ruído levou a superfície gerada a mover-se no sentido dos desvios positivos uma vez que em todos os casos se verificou a diminuição do desvio positivo máximo e aumento do valor máximo do desvio negativo. Na esfera e no plano a remoção de ruído também foi fundamental uma vez que se observou a diminuição de todos os desvios.

O efeito da simplificação na nuvem de pontos é um pouco ambíguo uma vez que todos os resultados obtidos, para os quatro métodos testados (em curva, aleatória, uniforme e híbrida) são muito díspares e não seguem nenhuma tendência. No entanto foi possível encontrar um resultado bastante satisfatório com a simplificação curva de 20% dos pontos uma vez que se observaram as maiores diminuições do desvio padrão e do máximo desvio positivo.

Mais uma vez, a suavização da malha foi indispensável na obtenção de superfícies de formas irregulares como foi possível verificar nas diminuições bastante acentuadas do desvio padrão e do valor máximo do desvio positivo. Na esfera e no plano as diminuições do desvio padrão e dos desvios máximos destacam mais uma vez a importância da suavização da malha de triângulos.

Tal como se tinha verificado nos estudos realizados com o software CATIA, o aumento da resolução da superfície é extremamente importante para a obtenção de uma malha com elevada precisão e que represente fielmente o modelo pretendido. Com a resolução máxima foi possível diminuir o desvio padrão em menos de metade e os desvios máximos em quase 300%.

A Tabela 5-10 apresenta as características estudadas e seleccionadas, que apresentam maior capacidade de reproduzir fielmente e com máxima precisão o modelo original.

Tabela 5-10: Características dos modelos finais utilizados no SolidWorks

<b>Modelo</b>	<b>Remoção de ruído</b>	<b>Simplificação</b>	<b>Coefficiente de suavização</b>	<b>Resolução da Superfície</b>
Mandíbula	1,22%	20% em curva	10	20
Esfera	10,35%	-	1	-
Plano	2,95%	-	10	-



## **6 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DIGITAIS OBTIDOS COM O MODELO FÍSICO ORIGINAL**

### **6.1 Metodologia**

Com a utilização da Máquina de Medição por Coordenadas foi possível comparar os modelos digitais (virtuais) de ambos os softwares com o modelo físico (modelos originais da mandíbula, esferas e paralelepípedo) e analisar algumas diferenças entre os dois softwares utilizados.

O *PowerInspect* (Delcam, Birmingham, UK) permite guardar num documento de texto as coordenadas obtidas a partir da apalpação do modelo físico. Estas coordenadas foram utilizadas para fazer a inspeção de todos os modelos digitais, com base nos mesmos pontos.

#### **6.1.1 Processo de alinhamento dos modelos**

Antes de realizar o processo de inspeção é necessário proceder ao alinhamento dos modelos. Ou seja, é necessário alinhar o referencial do modelo físico com o referencial do modelo digital para que as coordenadas de ambos sejam coincidentes. Neste trabalho foi utilizado um alinhamento do tipo RPS (*Reference Positioning System*) através de duas esferas e um plano que permitiu orientar o modelo em relação a um referencial.

O alinhamento dos modelos foi feito através das duas bolas de pingue-pongue e do plano da mesa, e depois foram criados três grupos de inspeção: para a mandíbula, para as esferas e para os planos. À medida que a inspeção foi feita fisicamente, as coordenadas de inspeção eram simultaneamente gravadas num documento de texto. O alinhamento realizado foi gravado da mesma forma e utilizado na inspeção de todos os modelos.

### 6.1.2 Processo de inspeção e obtenção de resultados

Depois de obter as coordenadas desejadas para o alinhamento e para os três grupos de inspeção, foi realizado o controlo dimensional dos modelos digitais. Ao contrário do método convencional de inspeção, em que a CMM espera o contacto físico com o modelo, este era substituído pela introdução das coordenadas guardadas anteriormente. Ou seja, a apalpação do modelo físico é simulada pela introdução das coordenadas do documento de texto e desta forma foi possível fazer o controlo dimensional dos modelos digitais sempre nos mesmos pontos.

Foram inspeccionados três modelos com níveis de tratamento diferentes, em ambos os softwares. Além da distinção entre os níveis de tratamento (grosseiro, fino, super fino), foi feita uma correspondência entre os comandos utilizados nos dois softwares de forma a obter modelos equivalentes e assim avaliar as potencialidades de cada um.

As Tabelas 6-1 e 6-2 permitem identificar quais as principais diferenças entre cada modelo.

Tabela 6-1: Características dos modelos digitais da mandíbula inspeccionados

Software	Modelo	Características
CATIA	Grosseiro	Nuvem de pontos sem filtro Malha de triângulos não suavizada e não otimizada Resolução 500 e desvio médio limite 1mm (valores por defeito)
	Fino	Utilização de filtro homogéneo 10% Malha de triângulos não suavizada e não otimizada Resolução 500 e desvio médio limite 1mm (valores por defeito)
	Super fino	Utilização de filtro homogéneo 10% Suavização de efeito simples e coeficiente 1 Malha de triângulos otimizada Resolução 5000 e desvio médio limite 0,05mm
SolidWorks	Grosseiro	Sem remoção de ruído e sem simplificação da nuvem de pontos Malha de triângulos não suavizada Resolução 10 (valor por defeito)
	Fino	Remoção de ruído: 1,22% Simplificação da nuvem de pontos de 20% em curva Malha de triângulos não suavizada Resolução 10 (valor por defeito)
	Super fino	Remoção de ruído: 1,22% Simplificação da nuvem de pontos de 20% em curva Suavização com coeficiente 10 Resolução 20

Todos os modelos (grosseiro, fino e super fino) da esfera e do plano foram gerados com reconhecimento esférico e planar, respectivamente. No SolidWorks, nenhuma nuvem de pontos de geometria regular foi sujeita a simplificação.

Tabela 6-2: Características dos modelos digitais da esfera e do plano inspeccionados

Software	Modelo	Características
<b>CATIA</b>	Esfera	Grosseiro Nuvem de pontos sem filtro Malha de triângulos não suavizada e não otimizada
		Fino Filtro homogêneo 10% Malha de triângulos não suavizada e não otimizada
		Super fino Filtro homogêneo 10% Suavização simples de coeficiente 1 Malha de triângulos otimizada
	Plano	Grosseiro Nuvem de pontos sem filtro Malha de triângulos não suavizada e não otimizada
		Fino Filtro adaptativo 10% Malha de triângulos não suavizada e não otimizada
		Super fino Filtro adaptativo 10% Suavização simples de coeficiente 1 Malha de triângulos otimizada
<b>SolidWorks</b>	Esfera	Grosseiro Nuvem de pontos sem remoção de ruído Malha de triângulos não suavizada
		Fino Remoção de ruído 10,35% Malha de triângulos não suavizada
		Super fino Remoção de ruído 10,35% Suavização coeficiente 1
	Plano	Grosseiro Nuvem de pontos sem remoção de ruído Malha de triângulos não suavizada
		Fino Remoção de ruído 2,95% Malha de triângulos não suavizada
		Super fino Remoção de ruído 2,95% Suavização coeficiente 10

De seguida são apresentados os resultados obtidos na inspeção dos diversos modelos para uma tolerância de 0.2mm. Os relatórios fornecidos pelo PowerInspect podem ser consultados no Anexo VII. Todos os desvios são apresentados em milímetros.

Tabela 6-3: Resultados da inspeção realizada na mandíbula

Resolução do modelo	CATIA			SolidWorks		
	Grosseira	Fina	Super fina	Grosseira	Fina	Super fina
Número de pontos	187	189	190	190	190	189
Pontos fora da tolerância	103	75	40	54	46	44
Performance (%)	45	60	79	72	76	77
Média dos desvios	-0.138	0.006	0.021	-0.024	-0.019	-0.018
Desvio padrão	0.247	0.236	0.154	0.165	0.161	0.162
Desvio máximo positivo	0.617	0.707	0.365	0.311	0.311	0.327
Desvio máximo negativo	-0.779	-0.618	-0.385	-0.474	-0.462	-0.453

Tabela 6-4: Resultados da inspeção realizada nas esferas

Resolução do modelo	CATIA			SolidWorks		
	Grosseira	Fina	Super fina	Grosseira	Fina	Super fina
Número de pontos	23	23	23	23	23	23
Pontos fora da tolerância	0	0	0	0	0	0
Performance (%)	100	100	100	100	100	100
Média dos desvios	-0.046	-0.050	0.019	-0.036	-0.042	-0.029
Desvio padrão	0.090	0.086	0.085	0.087	0.082	0.086
Desvio máximo positivo	0.147	0.121	0.177	0.154	0.139	0.162
Desvio máximo negativo	-0.159	-0.156	0.083	-0.145	-0.145	-0.137

Tabela 6-5: Resultados da inspeção realizada nos planos

Resolução do modelo	CATIA			SolidWorks		
	Grosseira	Fina	Super fina	Grosseira	Fina	Super fina
Número de pontos	21	21	21	21	21	21
Pontos fora da tolerância	1	1	0	1	1	1
Performance (%)	95	95	100	95	95	95
Média dos desvios	-0.067	-0.057	-0.040	-0.073	-0.066	-0.072
Desvio padrão	0.063	0.060	0.062	0.064	0.062	0.066
Desvio máximo positivo	0.023	0.027	0.050	0.009	0.006	0.008
Desvio máximo negativo	-0.258	-0.221	-0.190	-0.271	-0.258	-0.278

## 6.2 Conclusões

Verificou-se que na obtenção de formas regulares (esféricas e planas) a variação dos resultados entre os diferentes níveis de tratamento é muito pequena. A comparação entre os modelos equivalentes dos dois softwares também permitiu observar que não existem diferenças significativas nos resultados finais. No caso dos modelos esféricos foi possível obter superfícies com todos os pontos dentro da tolerância (0.2mm) nos três níveis de tratamento, enquanto nos modelos planos a performance apenas atingiu os 95% à exceção da malha super fina no CATIA que atingiu os 100%.

Na obtenção de formas irregulares (mandíbula) observou-se claramente o efeito dos comandos utilizados e as diferenças entre cada nível de tratamento. Estas diferenças foram bastante acentuadas no software CATIA, em que a utilização simultânea de filtro, suavização e otimização permitiu obter mais 35% de pontos dentro da tolerância e ainda reduzir o desvio padrão cerca de 60% em relação à superfície sem qualquer tratamento. Com o software SolidWorks, apesar de um ligeiro aumento da performance com os tratamentos a que o modelo foi sujeito, observou-se que as diferenças não são tão expressivas como no CATIA e que os maiores valores de desvios negativos e positivos também não sofrem oscilações significativas.

Esta parte do trabalho revelou-se fundamental para a avaliação dos métodos utilizados na obtenção dos modelos digitais. Também foi possível observar de uma forma clara a evolução da qualidade das superfícies, nomeadamente na geração de superfícies de formas irregulares enquanto nas restantes formas os resultados sofreram oscilações muito ligeiras.

## 7 CONCLUSÕES GERAIS

De uma forma geral, neste trabalho foi abordada a problemática da obtenção de um modelo digital tridimensional a partir de uma nuvem de pontos, através da apresentação de uma metodologia de tratamento e processamento computacional para a geração de modelos 3D capaz de reproduzir fielmente e com precisão o modelo original. Esta metodologia foi devidamente avaliada através do estudo e análise comparativa entre os desvios geométricos e dimensionais apresentados pelos modelos digitais em relação ao modelo físico.

A primeira etapa consistiu no levantamento de forma do objecto de estudo. Em relação à tecnologia de *scanner* laser 3D (LPX-250) utilizada, foi possível concluir que, apesar de não possuir uma precisão elevada (0.2 mm) e por este motivo ser responsável por grande parte dos desvios, é um método suficientemente válido para realizar a aquisição de dados de geometrias irregulares e regulares. O *scanner* laser 3D baseia-se numa tecnologia de fácil utilização e é capaz de realizar digitalizações em curtos períodos de tempo.

Em relação às ferramentas de modelação utilizadas - CATIA e SolidWorks – pode-se salientar o facto de ambos os softwares serem bastante intuitivos e permitirem uma fácil aprendizagem das técnicas de geração de superfícies. O CATIA revelou-se uma ferramenta muito poderosa, tanto ao nível da versatilidade de opções para tratamento de nuvens de pontos, malhas de triângulos e superfícies, como ao nível da avaliação dos desvios obtidos e erros gerados. Por sua vez, o SolidWorks é um software que facilita, e ao mesmo tempo limita bastante o trabalho do utilizador uma vez que a geração de superfícies deve obedecer à sequência proposta. A avaliação dos desvios também é mais limitada relativamente ao número de dados fornecidos nos dois programas.

A nível experimental, a utilização da máquina de medição por coordenadas permitiu avaliar a metodologia adoptada na geração de superfícies. Além disso, foi possível perceber a utilidade das ferramentas utilizadas nas várias etapas da metodologia seguida neste trabalho.

Em ambos os softwares, verificou-se que na obtenção de geometrias regulares as superfícies mais grosseiras atingiram uma performance de 95% nos planos e 100% nas esferas. Este facto mostra que o detalhe obtido na digitalização das formas regulares foi muito elevado e que por este motivo, tratamentos de melhoramento da superfície tais como remoção de ruído da nuvem de pontos ou suavização da malha de triângulos, não são imprescindíveis para o aumento da precisão da superfície.

Na obtenção de superfícies de formas irregulares observou-se que a amplitude da percentagem de pontos dentro da tolerância estabelecida foi bastante mais elevada no CATIA do que no SolidWorks. Relativamente à qualidade da superfície dos modelos, a performance apresentada pelo CATIA varia entre 45 e 79% enquanto no SolidWorks o intervalo diminuiu significativamente, variando entre 72 e 77%. Este facto permitiu concluir que o CATIA possibilita uma maior manipulação dos resultados pretendidos, ou seja, possibilita uma maior liberdade ao utilizador para escolher o tipo de superfície que pretende gerar.

No que diz respeito aos resultados mais precisos, com uma tolerância de 0.2 mm, foi possível obter uma performance de 77% no SolidWorks e 79% no CATIA na geração de superfícies irregulares. A superfície obtida no CATIA tem como características: filtro homogéneo 10%, malha de triângulos otimizada e com suavização simples de coeficiente 1, resolução 5000 e desvio médio limite 0,05mm. Por sua vez, a superfície obtida no SolidWorks tem as seguintes características: remoção de ruído de 1,22%, suavização de coeficiente 10 e resolução 20.

Em relação aos resultados mais precisos na obtenção de superfícies de formas regulares, estes foram substancialmente melhores: a performance atingida na geração de superfícies esféricas foi de 100% em ambos os softwares enquanto na geração de superfícies planas, CATIA e SolidWorks atingiram uma performance de 100 e 95%, respectivamente. No que diz respeito à esfera, no CATIA a superfície foi obtida com a utilização de um filtro homogéneo 10%, malha de triângulos suavizada com efeito simples de coeficiente 1 e posteriormente otimizada, enquanto no SolidWorks foi obtida com remoção de ruído de 10,25% e suavização de coeficiente 1. Relativamente ao modelo do plano no CATIA, este foi gerado com as seguintes características: filtro adaptativo 10%, malha otimizada e com suavização simples de coeficiente 1. A superfície do plano obtida no SolidWorks foi obtida com remoção de ruído de 2,95% e a malha de triângulos foi suavizada com coeficiente 10. Em ambos os softwares o reconhecimento da geometria utilizado foi esférico e planar para esfera e plano, respectivamente.

De uma forma geral, os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que a metodologia de modelação adoptada é capaz de gerar modelos digitais que reproduzem eficazmente o modelo físico, uma vez que os resultados apresentam baixa variabilidade entre nuvem de pontos e a superfície gerada possibilitando uma boa precisão final.

## REFERÊNCIAS

Aberlink. CMM. Disponível em <http://www.aberlink.com>. Consulta dia 15/08/09.

Alves, N., 2004. *Integração de engenharia inversa no processo produtivo. Enquadramento em CAD/CAM/CAE e RP/RT*, Texto de apoio, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria.

Bradley, C. e Currie, B., 2005, *Advances in the Field of Reverse Engineering*. Computer-Aided Design & Applications, Vol 2, pp. 697-706

Chen, Y., Yang, Z. et al, 2005, *Haptic Modeling in Rapid Product Development*.

Coimbra, C., 2007, *Scanner 3D*. Texto de apoio, CENFIM.

Evaristo, R., 2003, *The management of distributed projects across cultures*. Journal of Global Information Management.

Ferreira, F., 2007, *Medição por contacto versus medição óptica em máquinas de medir por coordenadas (3D)*, Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica.

Foggiato, J. A., Volpato, N. et al, 2007, *Recomendações para modelação em sistemas CAD-3D*. 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Brasil.

Hnátík, J., 2007, *Spline filtration of a cloud of points measured during the digitalization process*.

Hohler, W., 2000, *CAD/CAM Workshop: What is Solid Modeling?*. Disponível em <http://www.xmlcreate.com/>. Consulta dia 11-11-2008.

Jacobs, P. F., 1990, *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers.

Lacourse, D. e Redmond, B., 2004, *When surfaces and solids collide: hybrid modelers overcome the limitations of other modelers*.

Menezes, D., 2006, *CAD 2.0 - Finally a Solution to the CAD Interoperability Problem*

Minetto, C. F., 2003, *Um estudo sobre curvas NURBS*. Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Mestrado.

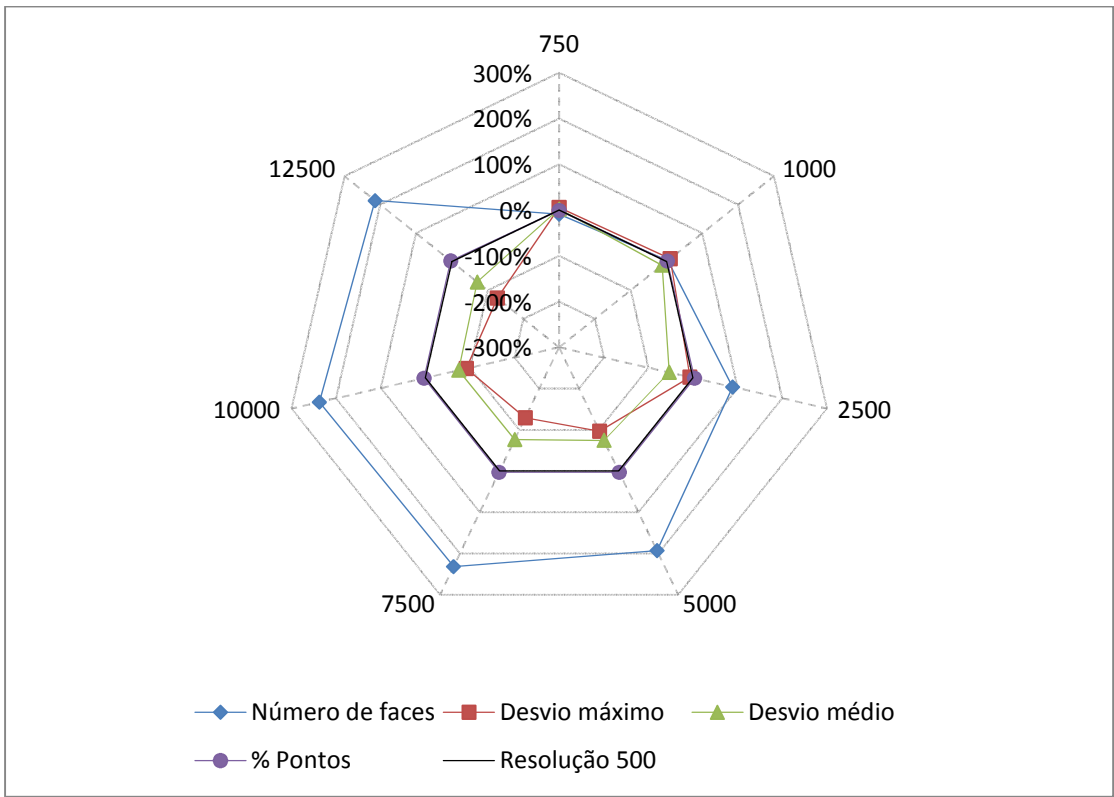
Nidiffer, K. E. e Dolan, D., 2005 *Evolving Distributed Project Management*. Focus: Project management



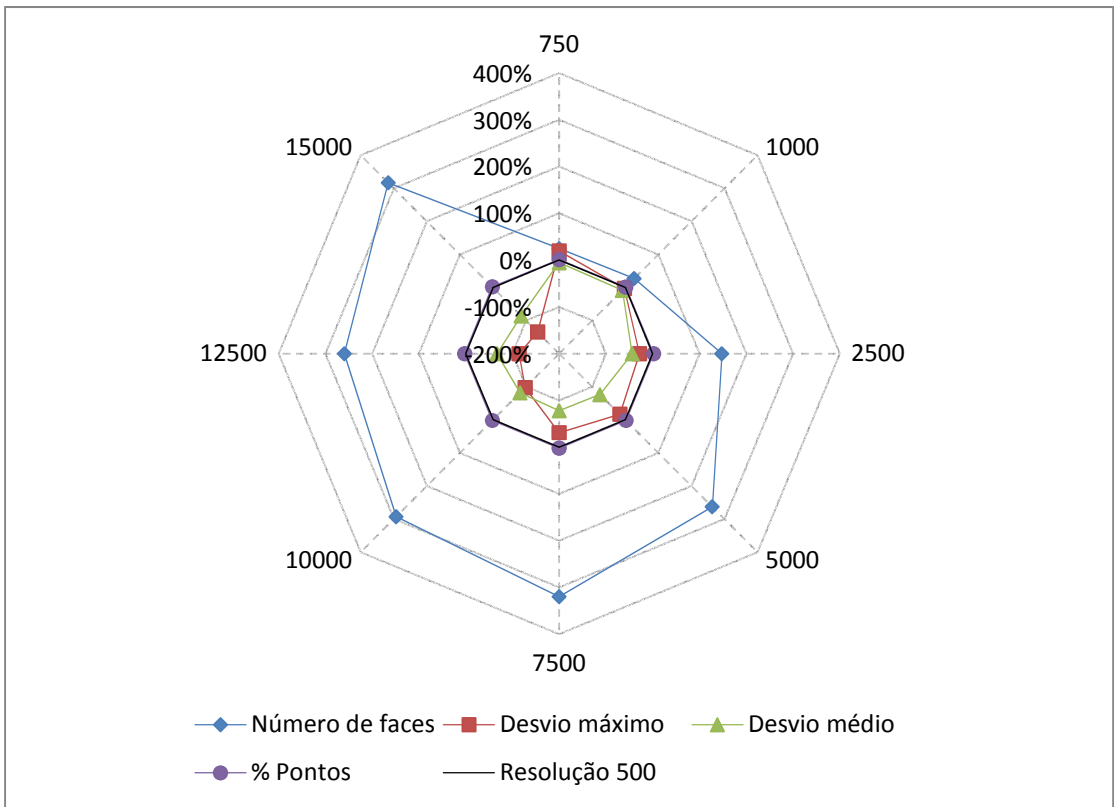
- Raja, V. e Fernandes, K. J., 2008, *Reverse Engineering - An industrial Perspective*, Springer Science.
- Rede Nacional de Prototipagem Rápida (RNPR), 2008, *Digitalização*. Consulta dia 06/12/08. Disponível em <http://www2.uninova.pt/rnpr>.
- Simões, J. A. O., 2002, *Apontamentos de Conceção e Fabrico Assistidos por Computador*, Universidade de Aveiro.
- Siodmok, P., 2008, *CAD overview*. Disponível em <http://www.designcouncil.org.uk/>. Consulta dia 15/10/08.
- Soni, K., Chen, D. et al, 2008, *Parameterization of prismatic shapes and reconstruction of free-form shapes in reverse engineering*. Advanced Manufacturing Technologies, Vol. 41, pp. 948-959.
- Stamati, V. e Ioannis, F., 2007, *Feature Based Approach to Re-engineering Objects of Freeform Design by Exploiting Point Cloud Morphology*, Universidade de Ioannina, Grécia.
- Tavares, J. e Coelho, C., 2003, *Introdução às técnicas para levantamento de forma tridimensional sem contacto*. Faculdade de Engenharias da Universidade do Porto
- Translation Tech, 2008, *Glossary: Dumb Solid*. Disponível em <http://www.translationtech.com>. Consulta dia 21-11-08.
- Tutorial-CATIA *Tutorial CATIA: Digitized Shape Editor*, Version 5, Release 14.
- Tutorial-SolidWorks *Tutorial SolidWorks: ScanTo3D*.
- Váradý, T., Martin, R. et al, 1997, *Reverse engineering of geometric models - an introduction*. Comput Aided Design, Vol. 29, pp. 255–268.
- Vinagre, M., 2008, *Obtenção de modelos anatómicos por prototipagem rápida*. Departamento de Engenharia Mecânica. Aveiro, Universidade de Aveiro. Tese de Mestrado.
- Vukasinovic, N., Kolsek, T. et al, 2007, *Case Study – surface reconstruction from point clouds for prosthesis production*. Engineering Design Vol. 18, pp. 478.
- Ye, X., Liu, H. et al, 2007, *Reverse innovative design: an integrated product design methodology*. Computer Aided Design Vol. 40, pp. 812-827.
- Zancul, E. e Rozenfel, H., 2003, *Engenharia Simultânea*, Disponível em <http://www.numa.org.br/>. Consulta dia 20-11-08.
- Zorin, D., 2002, *Curvature and Geodesics, Discrete Laplacian and related smoothing methods*. Topics in Computer Graphics: Geometric Modeling. Topics in Computer Graphics: Geometric Modeling

ANEXOS

ANEXO I

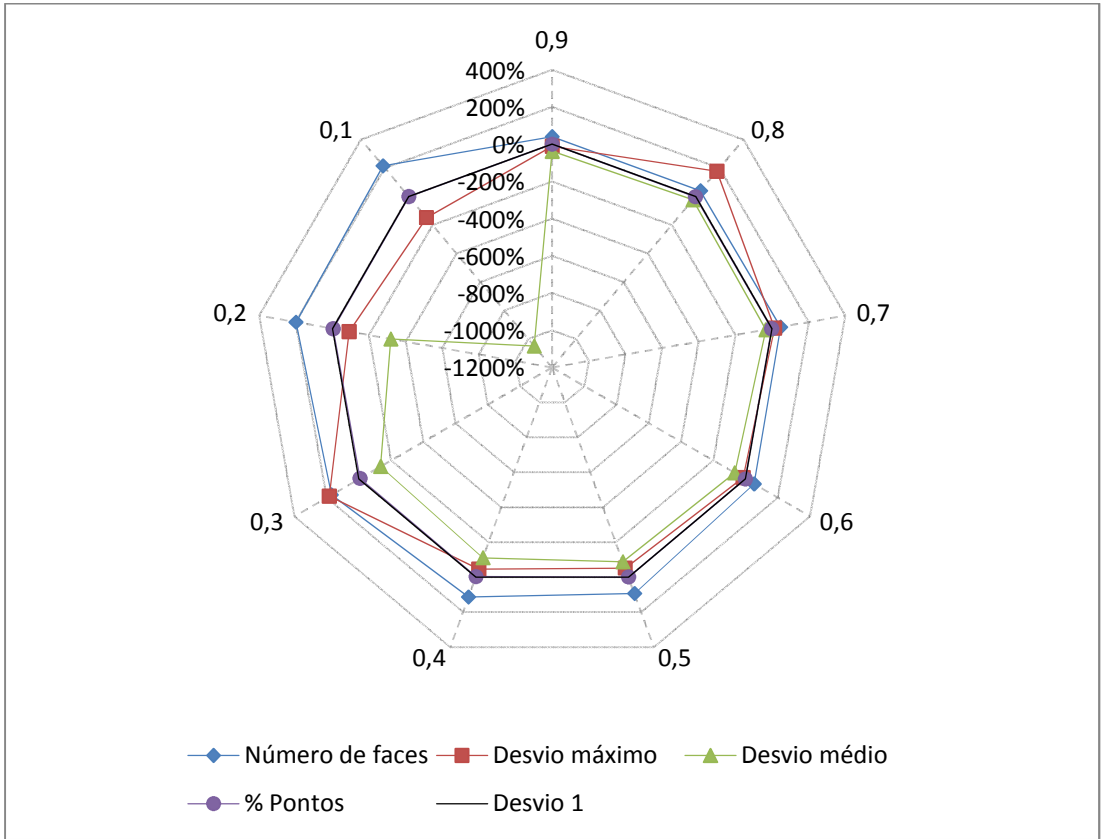


Análise do aumento da resolução da superfície na malha com filtro adaptativo 30%

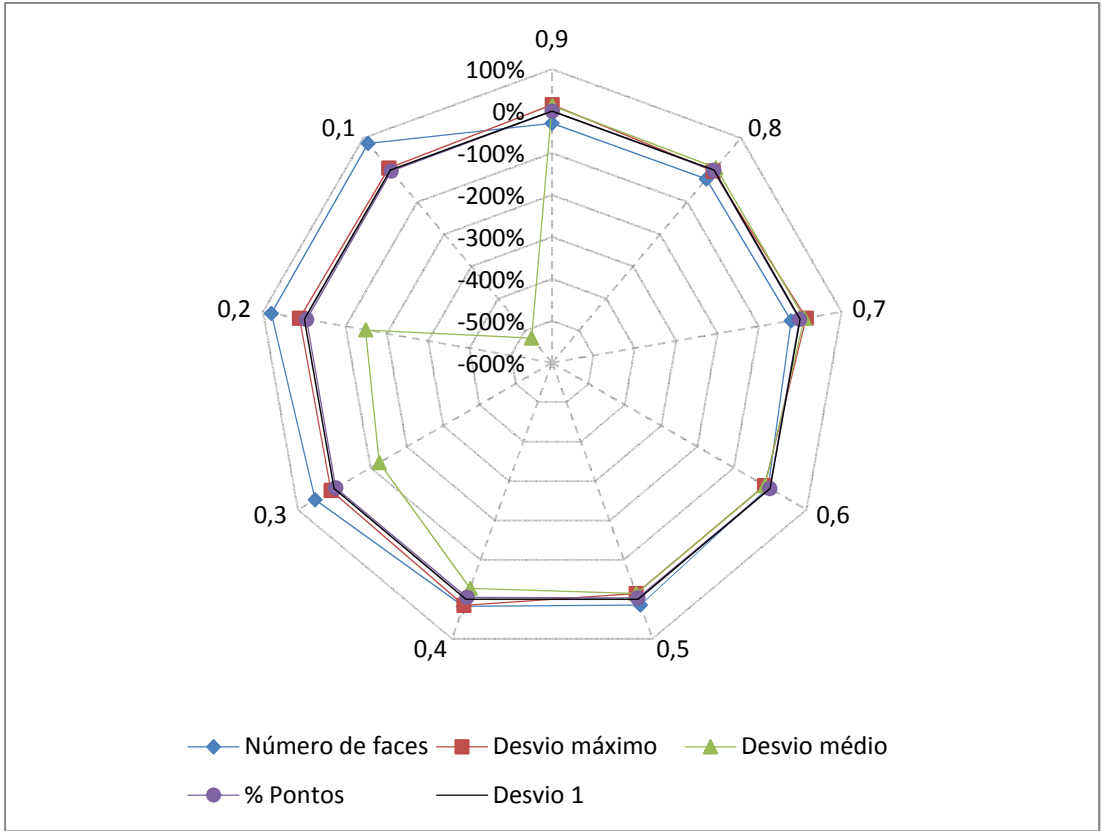


Análise do aumento da resolução da superfície na malha com filtro homogêneo 10%

ANEXO II



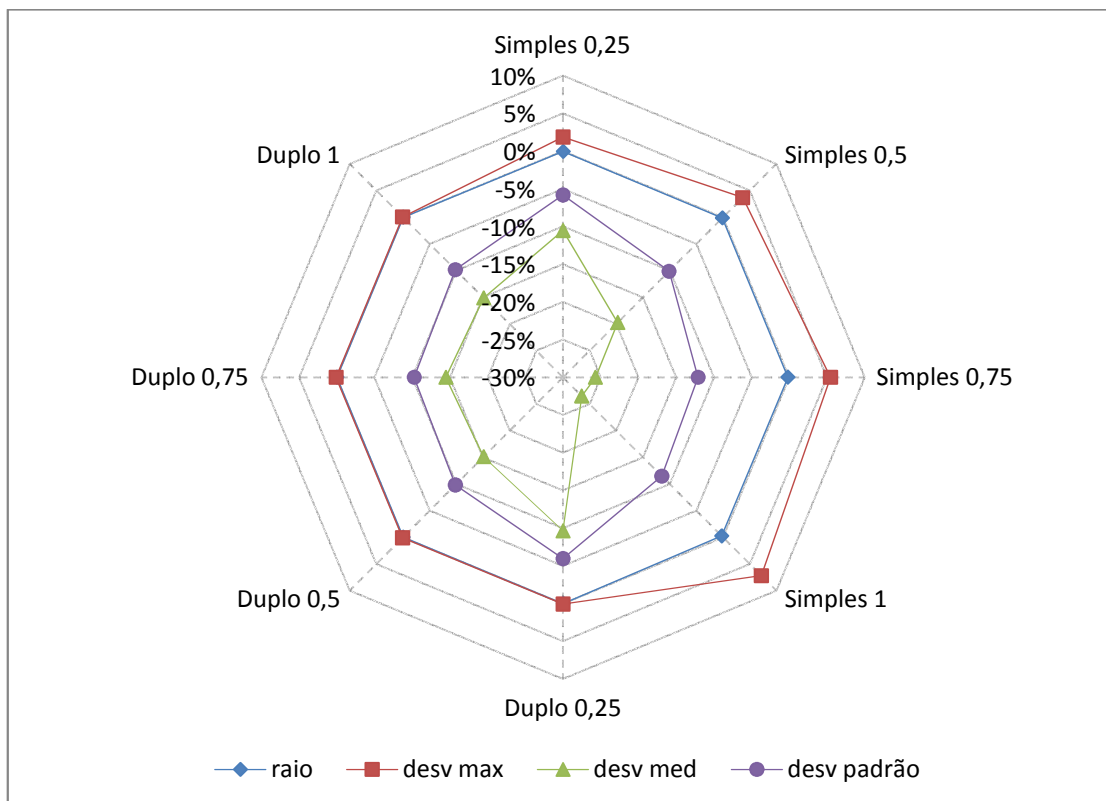
Análise da diminuição do desvio médio limite na malha com filtro adaptativo 30%



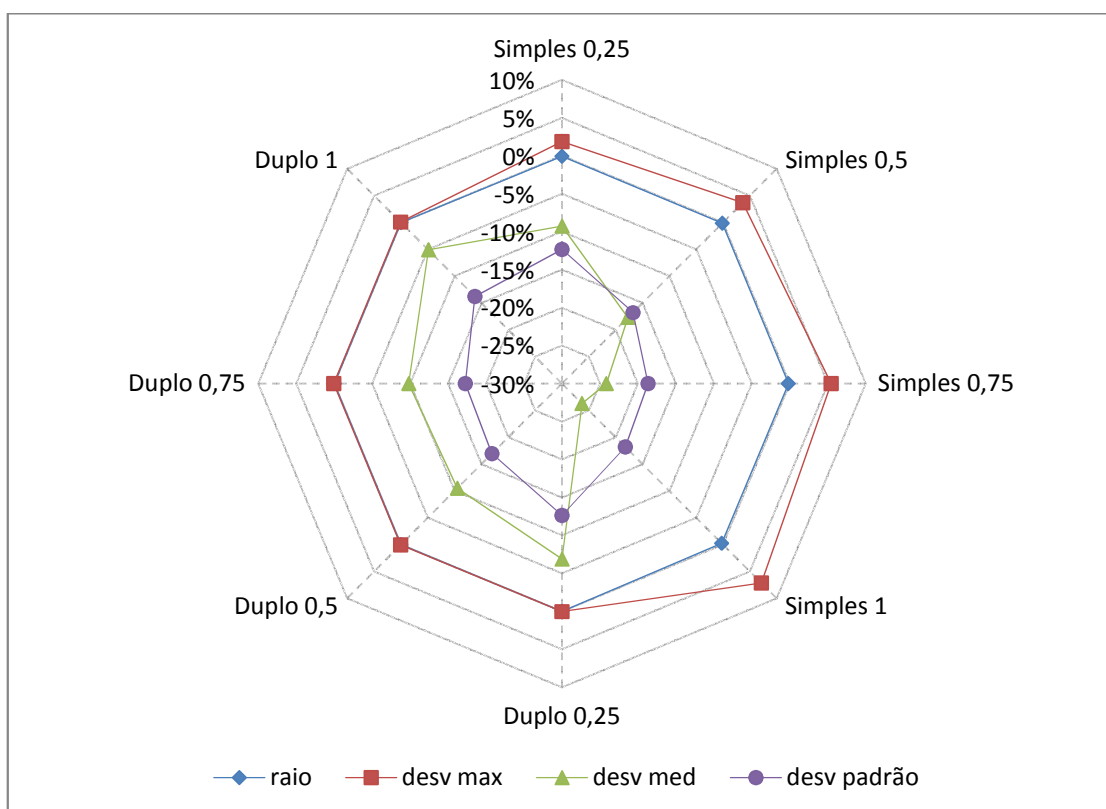
Análise da diminuição do desvio médio limite na malha com filtro homogêneo 10%

### ANEXO III

#### Esferas

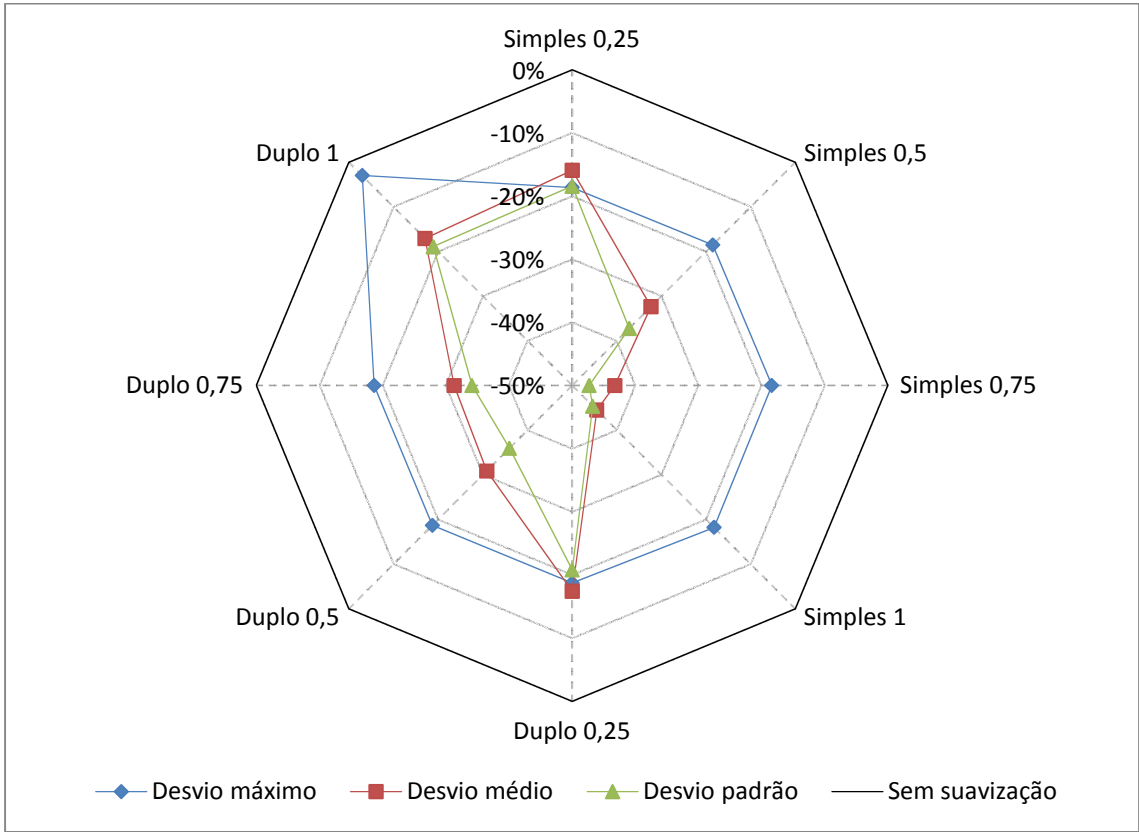


Análise do efeito de suavização na malha com filtro homogêneo 10% do modelo esférico

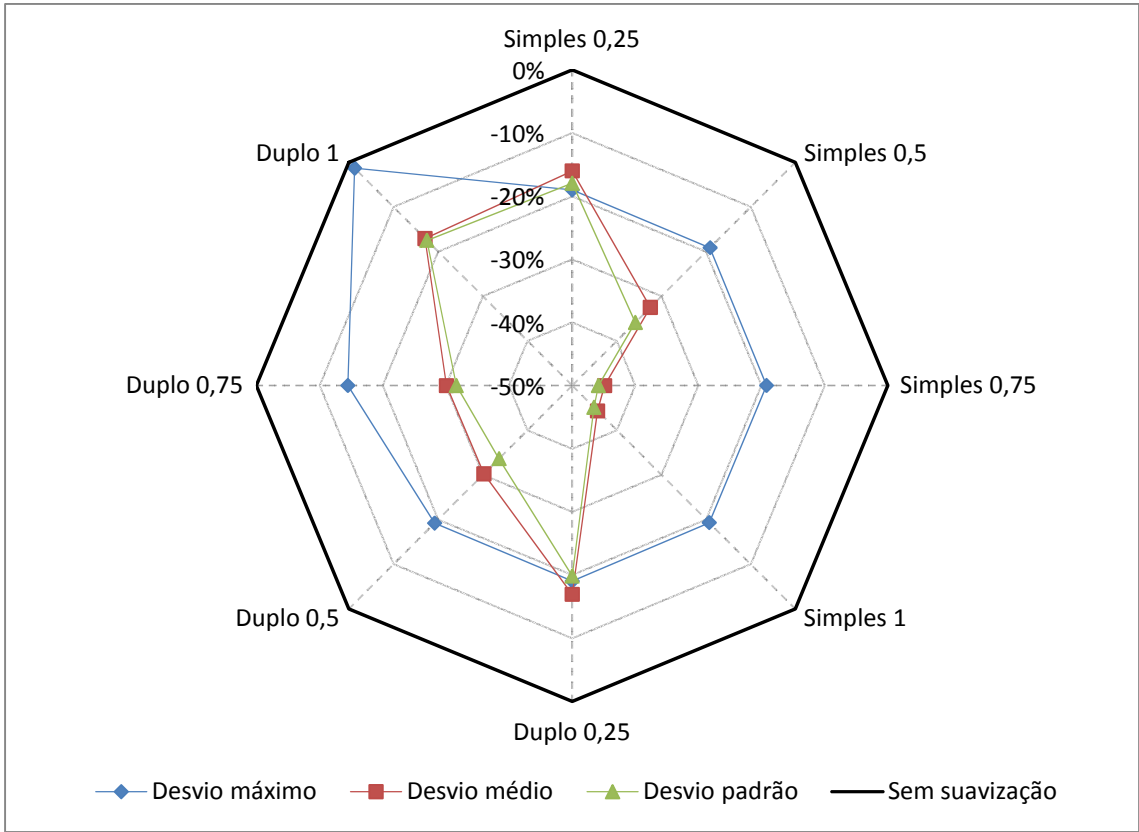


Análise do efeito de suavização na malha com filtro adaptativo 10% do modelo esférico

Planos



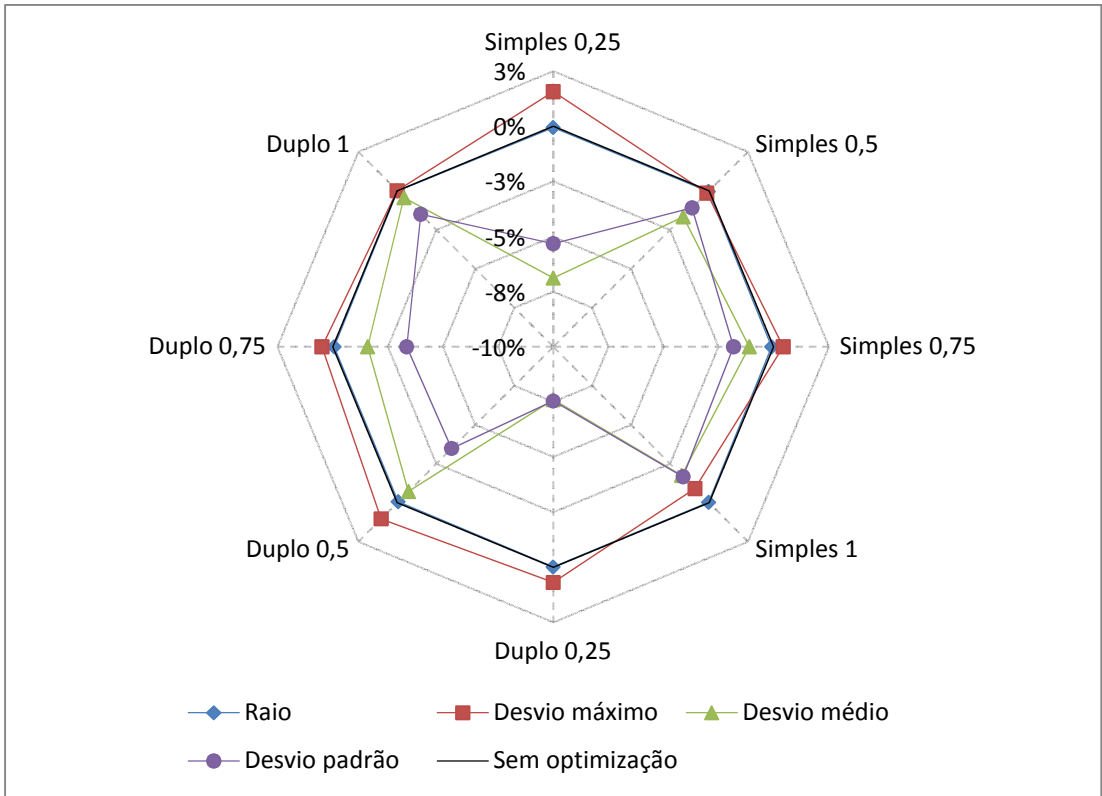
Análise do efeito de suavização na malha com filtro homogêneo 10% do modelo plano



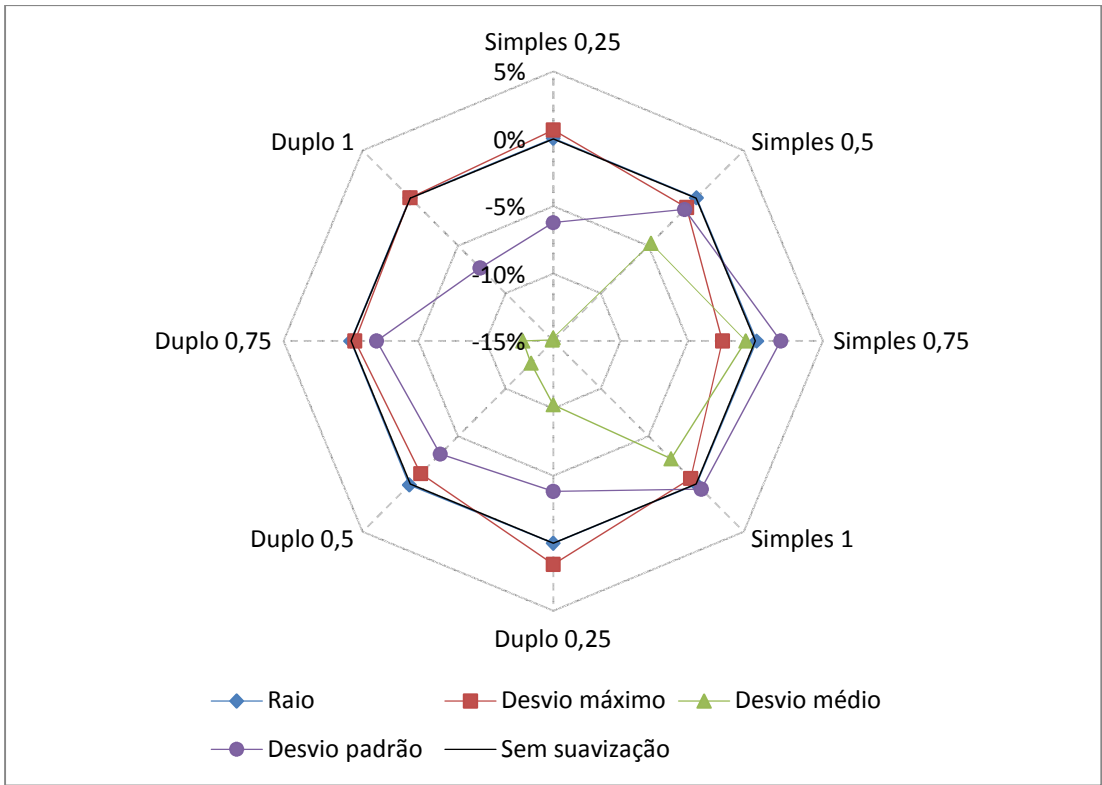
Análise do efeito de suavização na malha com filtro adaptativo 10% do modelo plano

ANEXO IV

Esferas

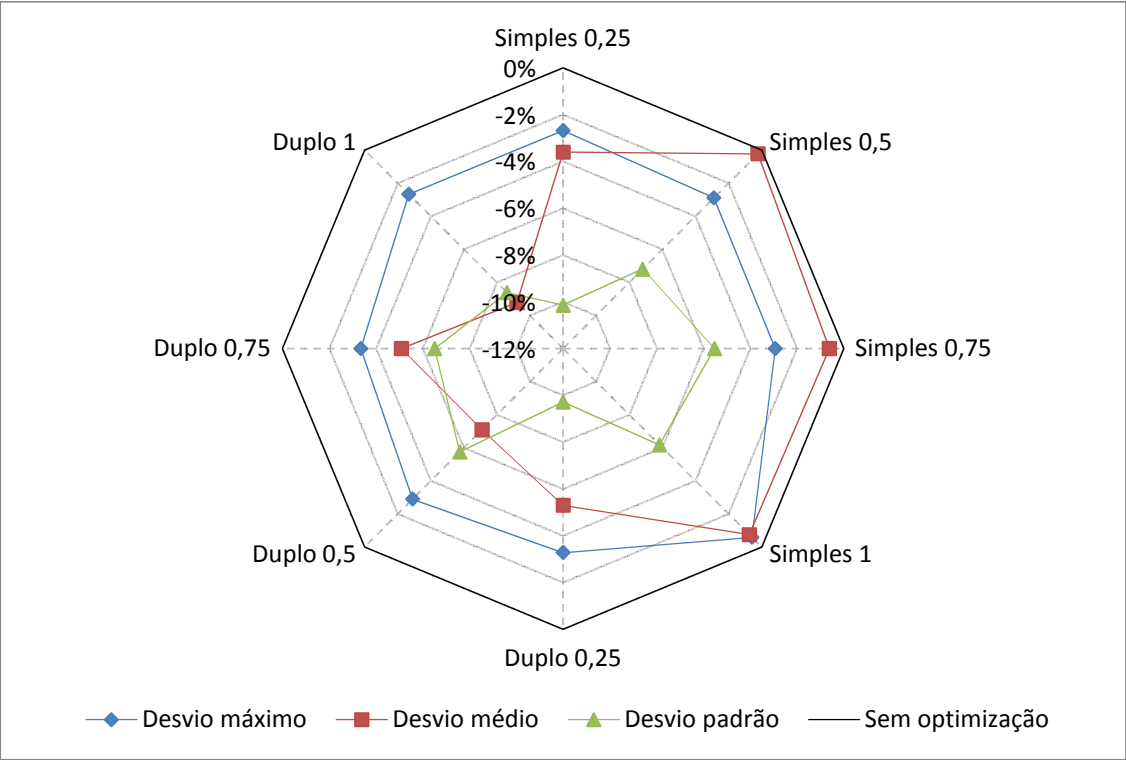


Análise do efeito de otimização na malha com filtro homogêneo 10% do modelo esférico

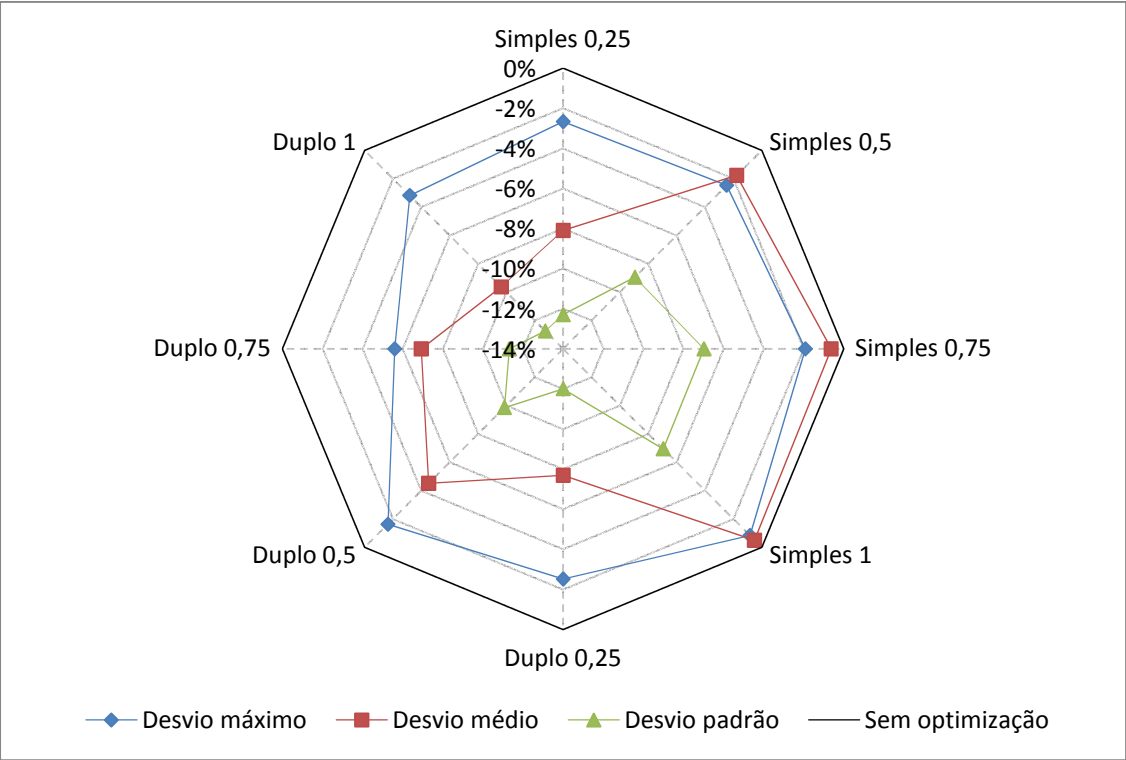


Análise do efeito de otimização na malha com filtro adaptativo 10% do modelo esférico

Planos

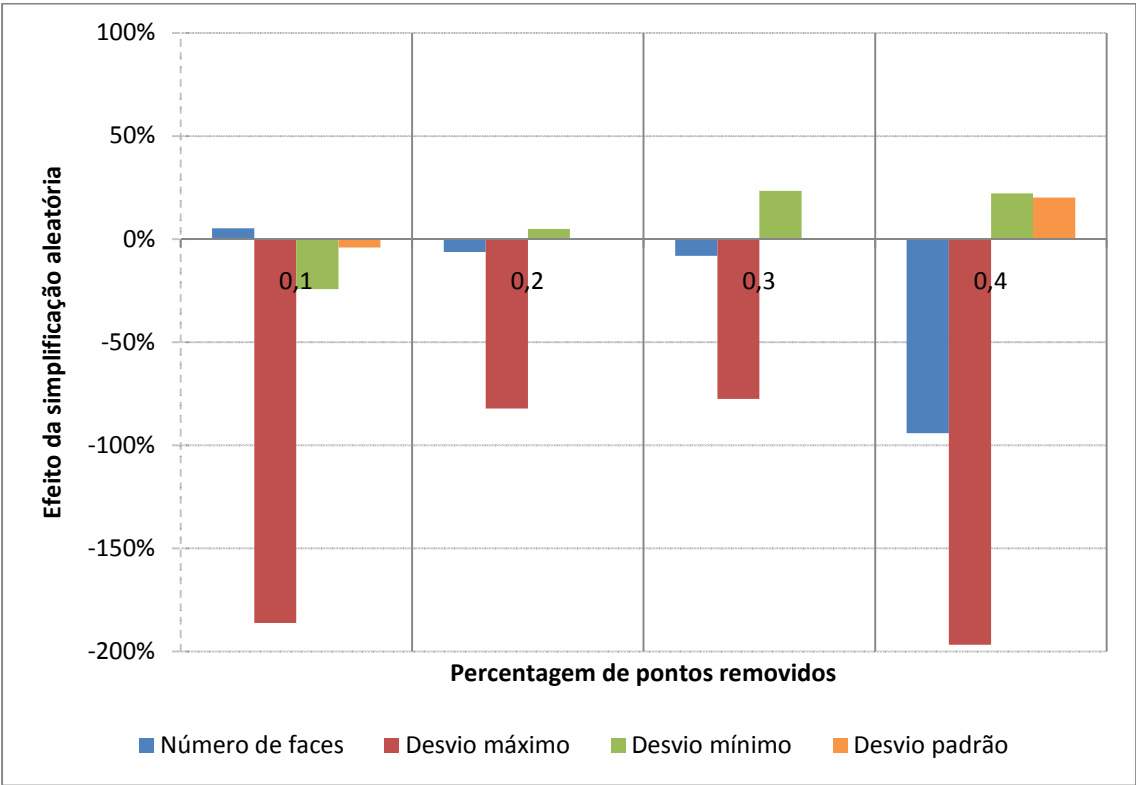


Análise do efeito de otimização na malha com filtro homogêneo 10% do modelo plano

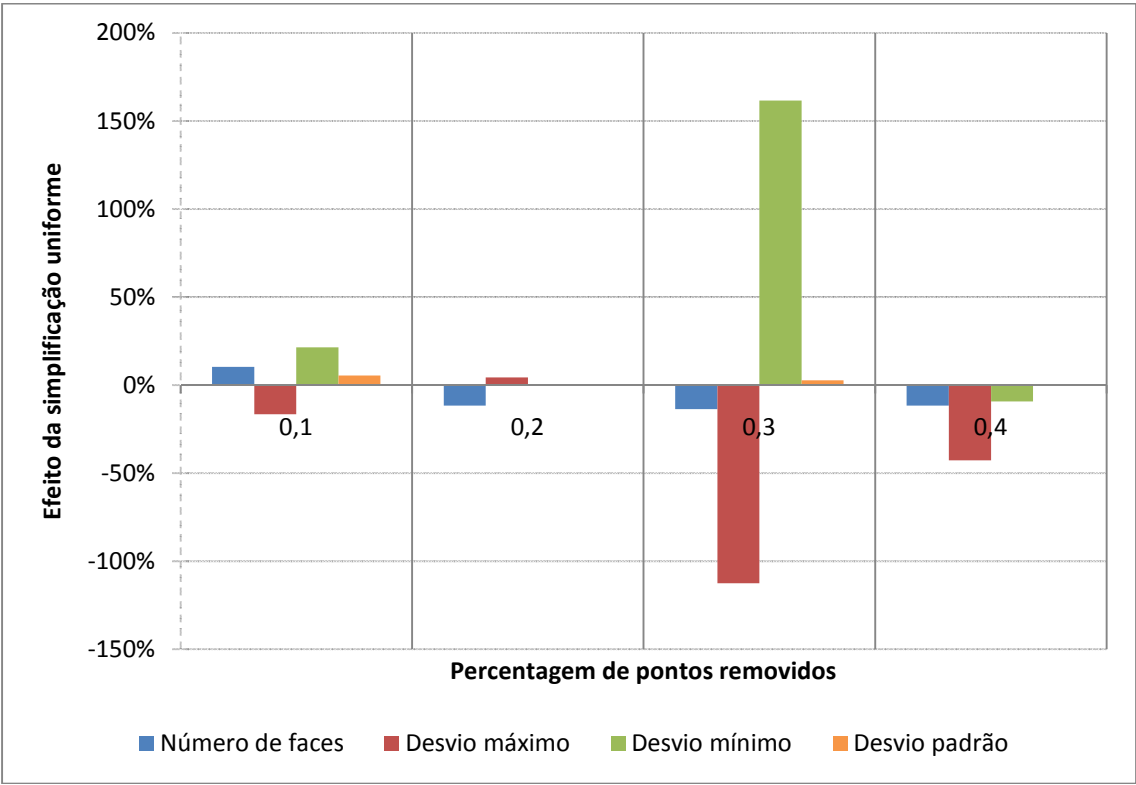


Análise do efeito de otimização na malha com filtro adaptativo 10% do modelo plano

ANEXO V

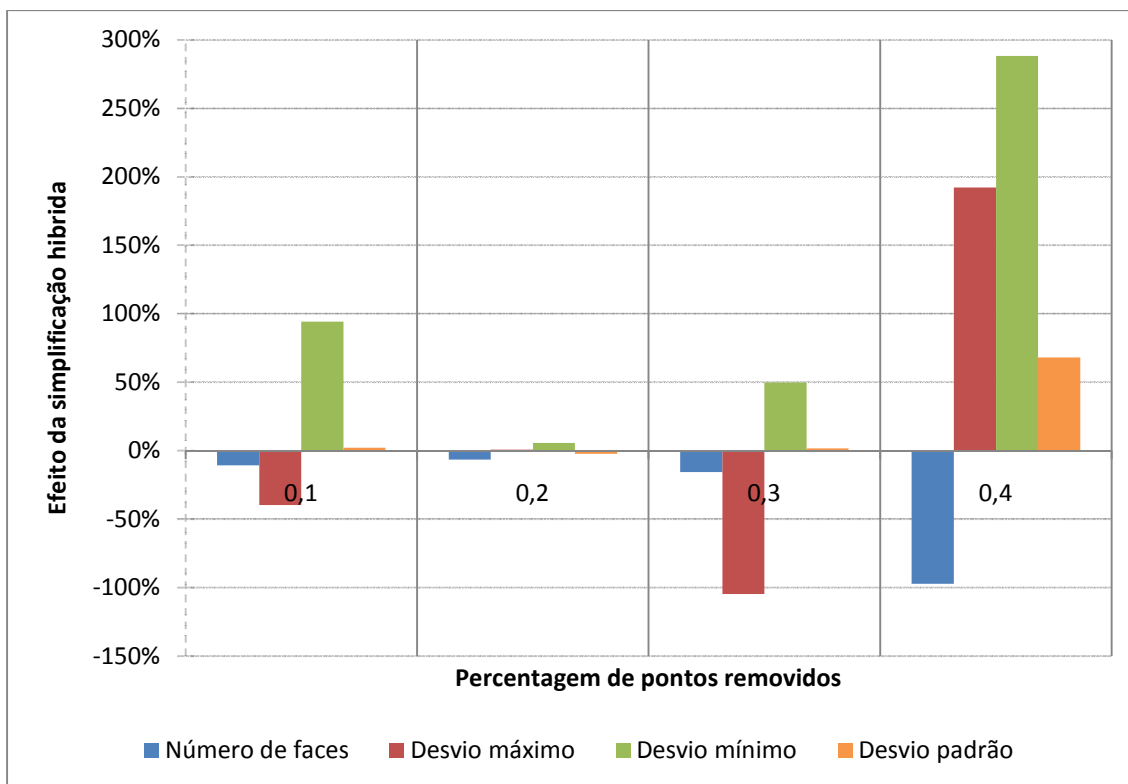


Análise da utilização de simplificação aleatória da nuvem de pontos inicial



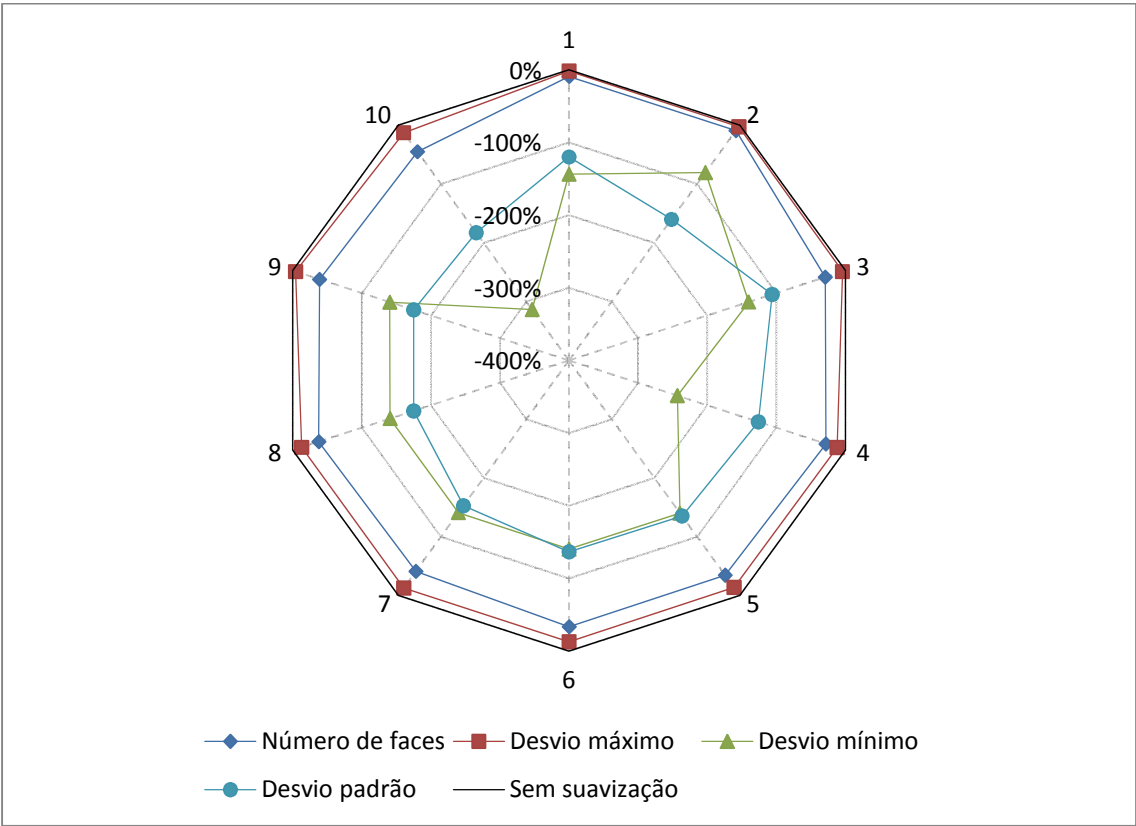
Análise da utilização de simplificação uniforme da nuvem de pontos inicial



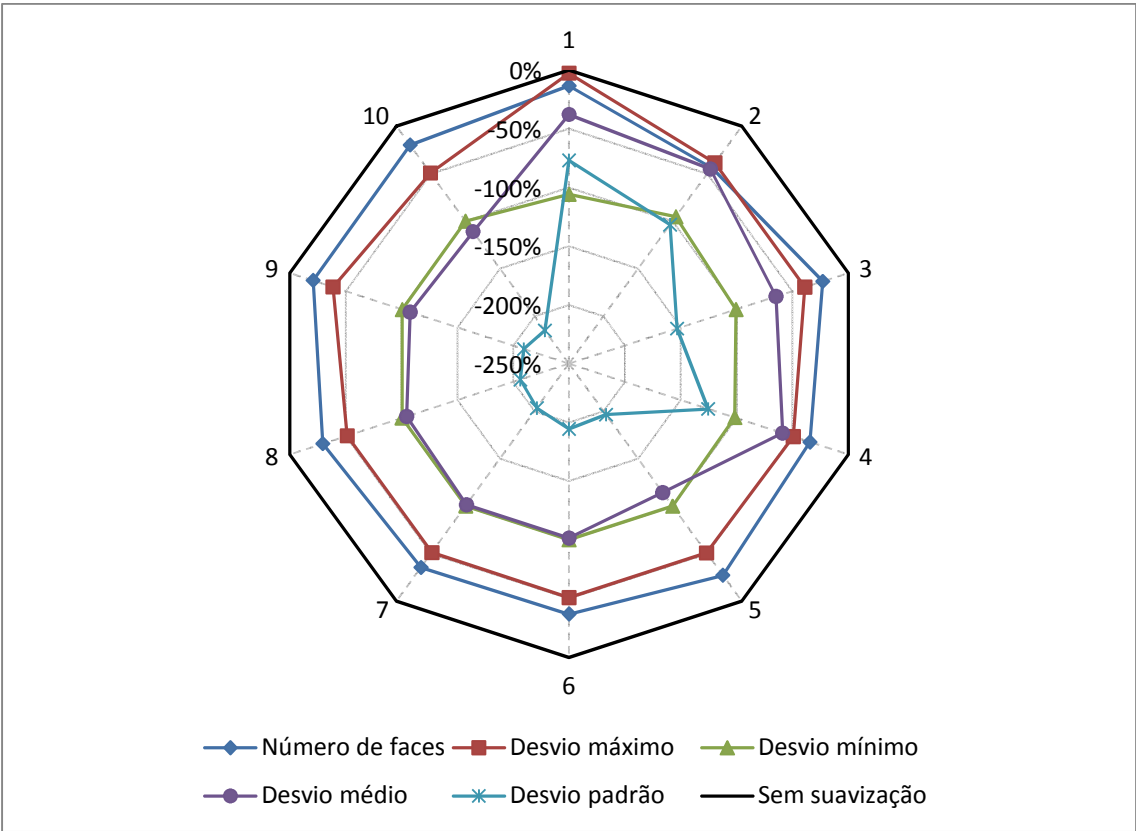


Análise da utilização de simplificação híbrida da nuvem de pontos inicial

ANEXO VI

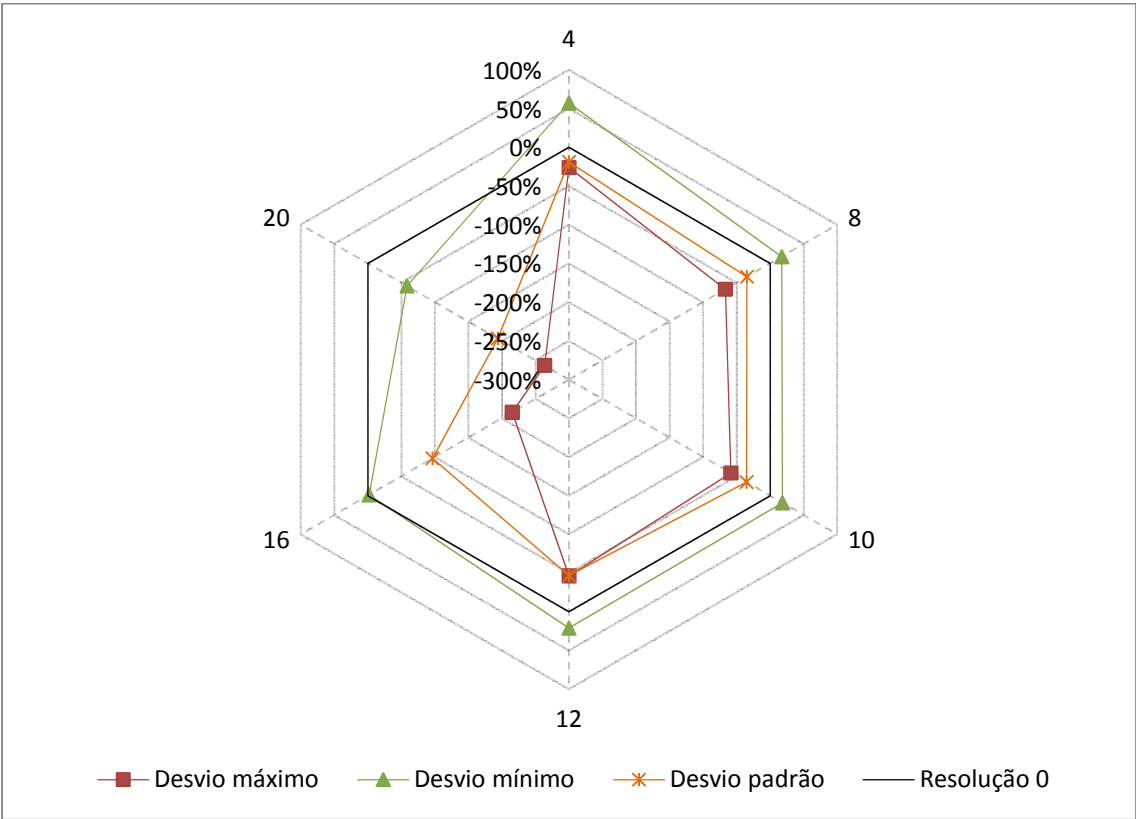


Análise do efeito de suavização na malha de triângulos com 1,22% de remoção de ruído

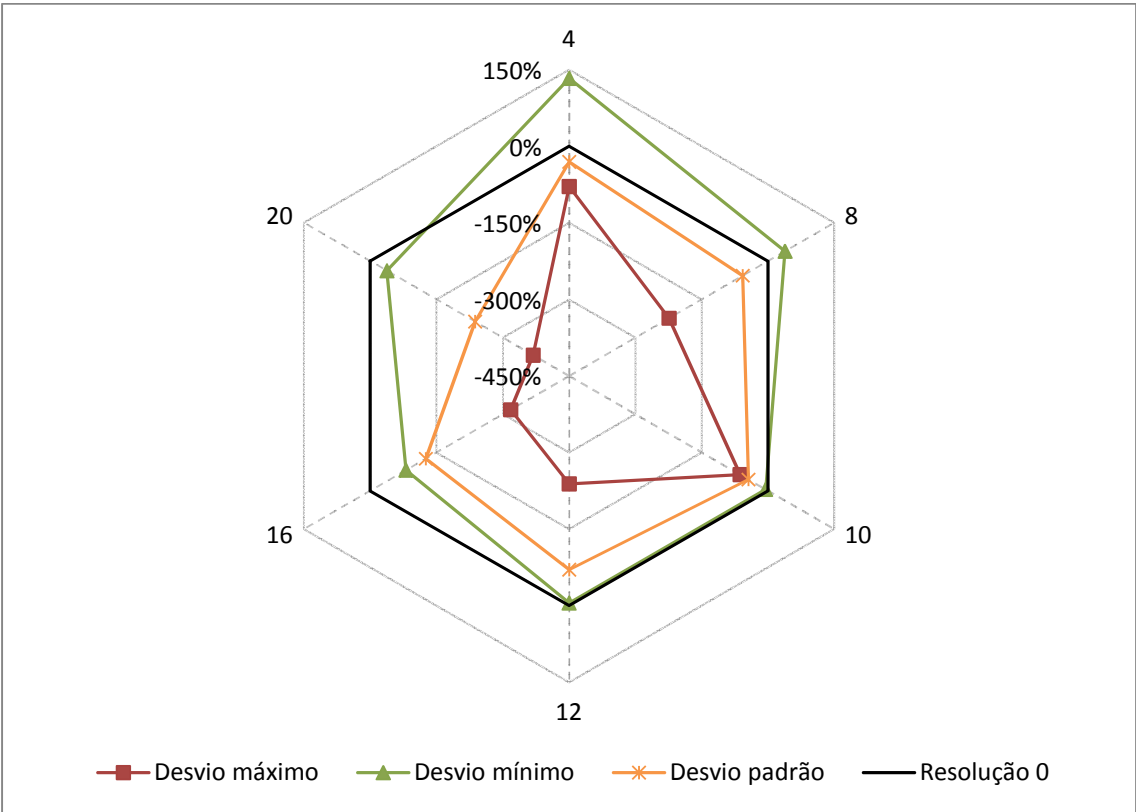


Análise do efeito de suavização na malha de triângulos com 3,43% de remoção de ruído

ANEXO VII



Análise do aumento da resolução da superfície na malha com 1.22% de remoção de ruído

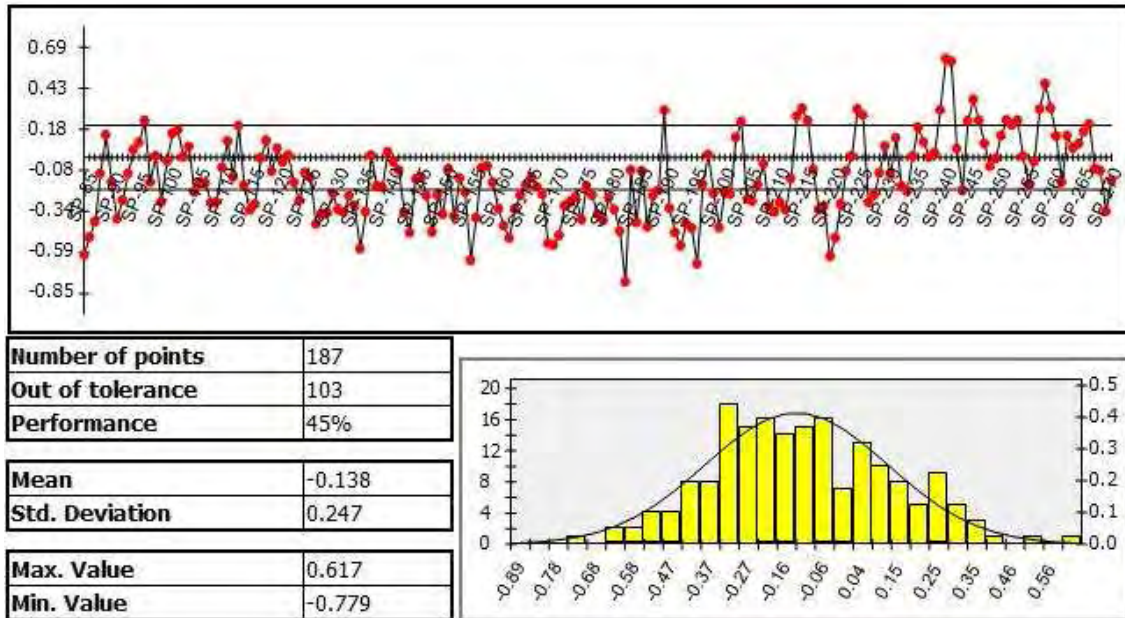


Análise do aumento da resolução da superfície na malha com 3.43% de remoção de ruído

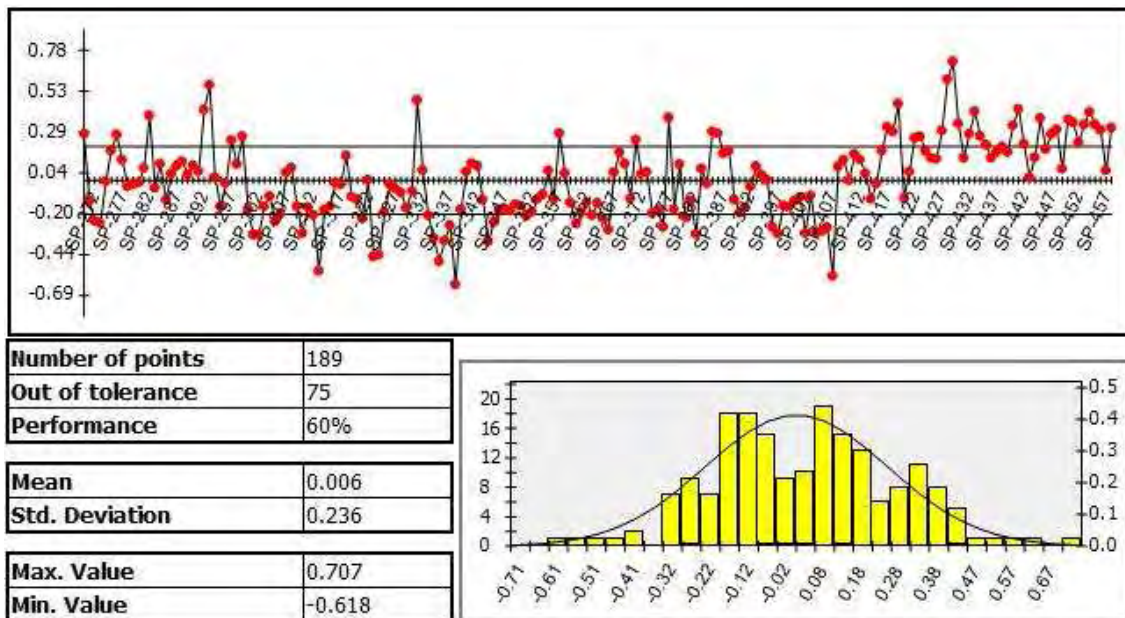
## ANEXO VIII

### Mandíbula – CATIA

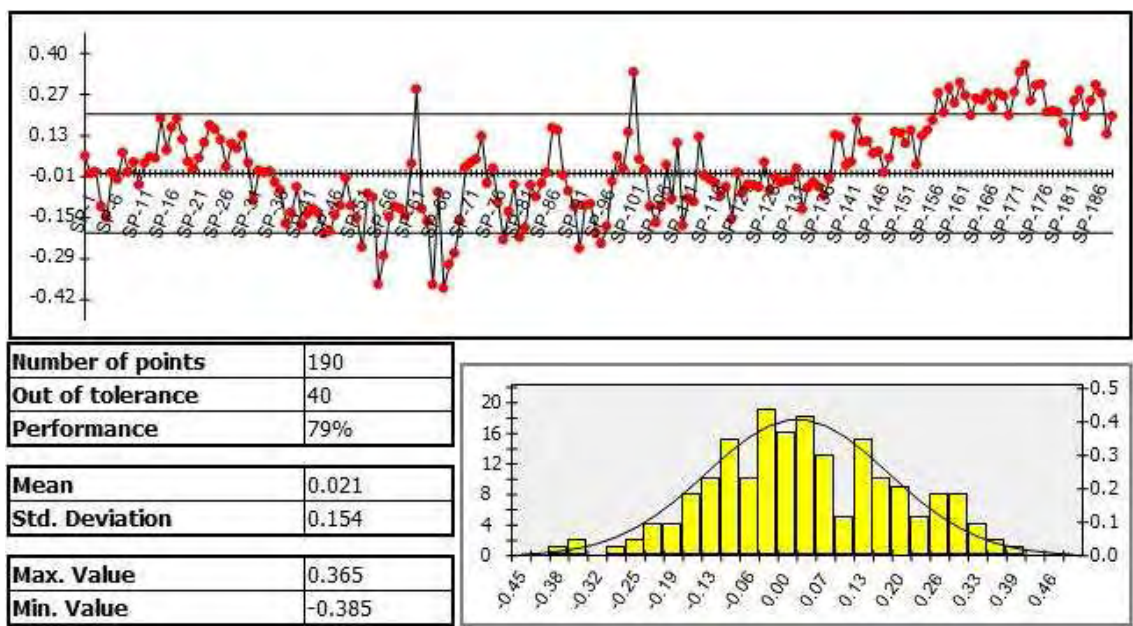
#### Malha grosseira



#### Malha fina

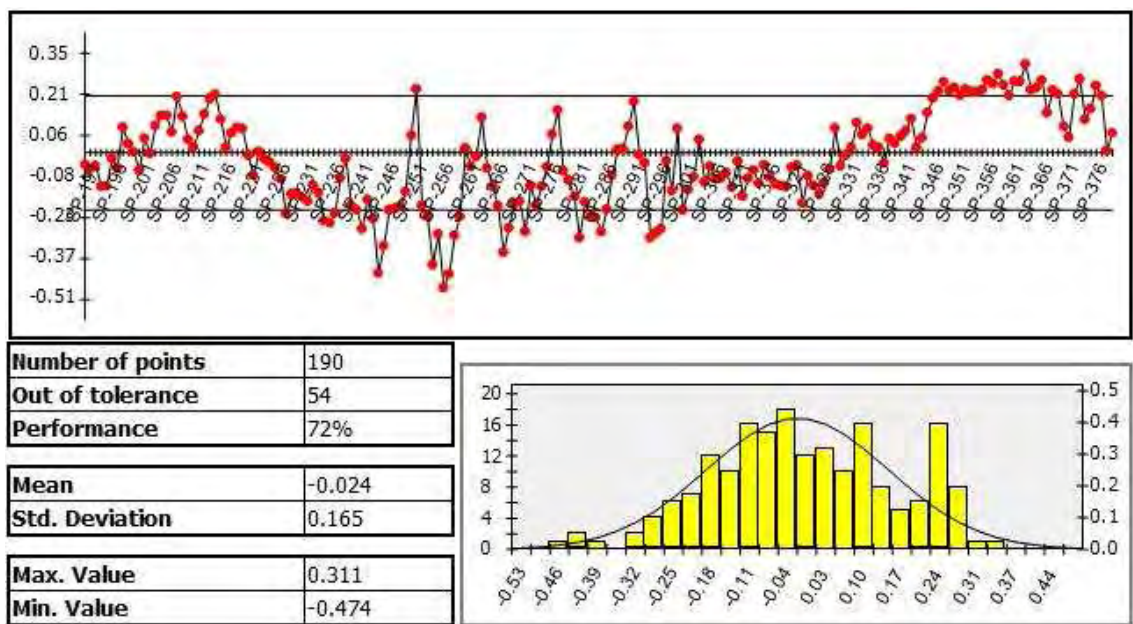


Malha Super fina



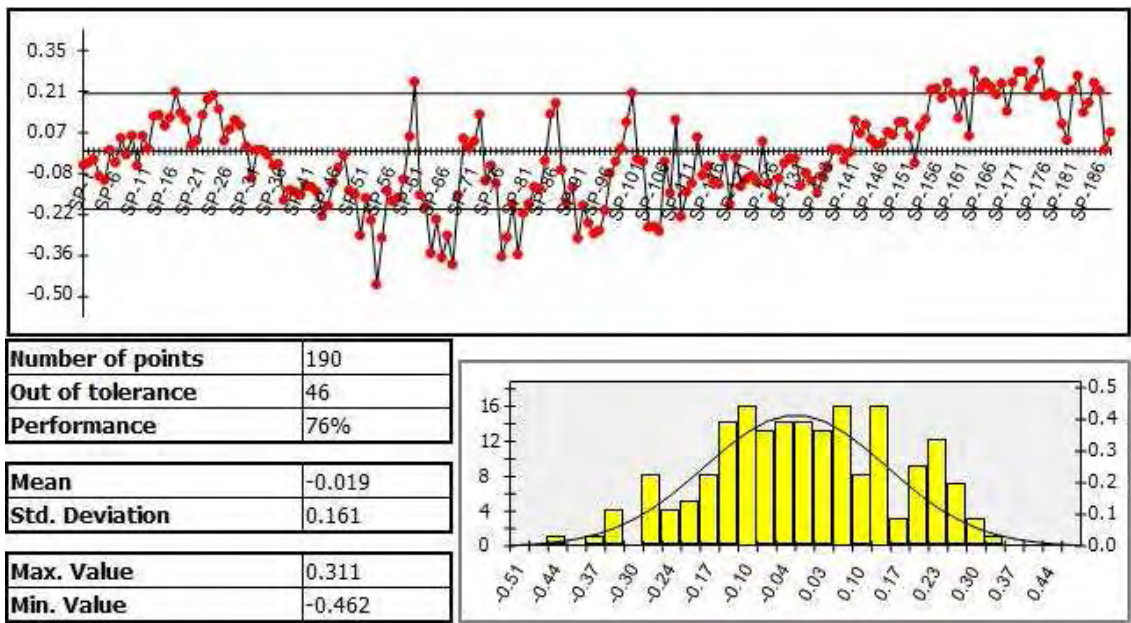
Mandíbula – SolidWorks

Malha grosseira

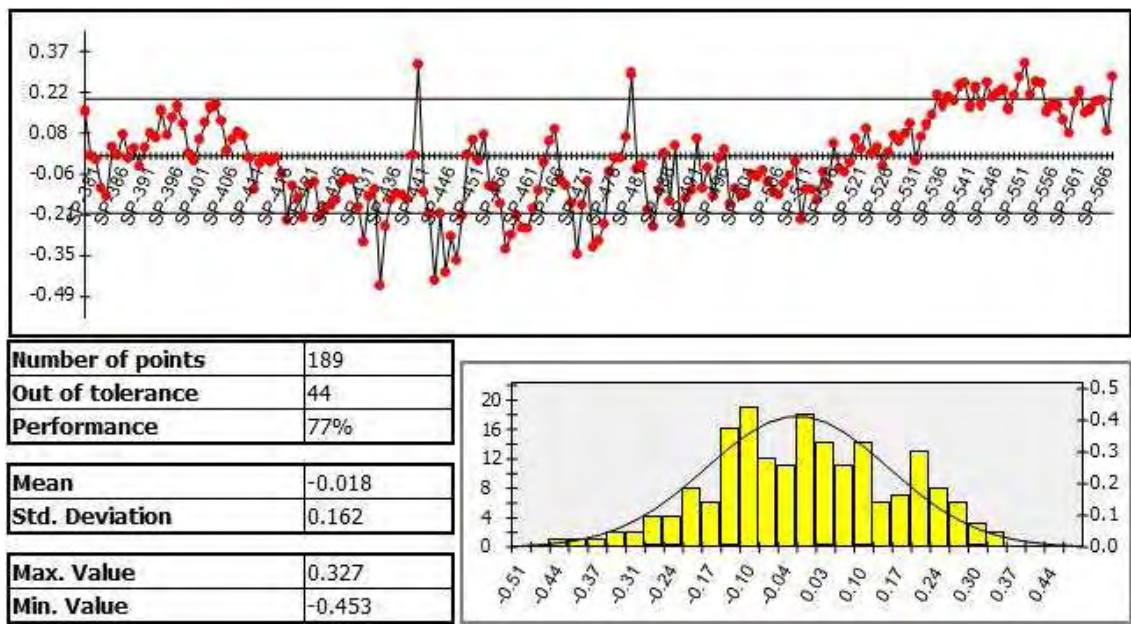




Malha fina

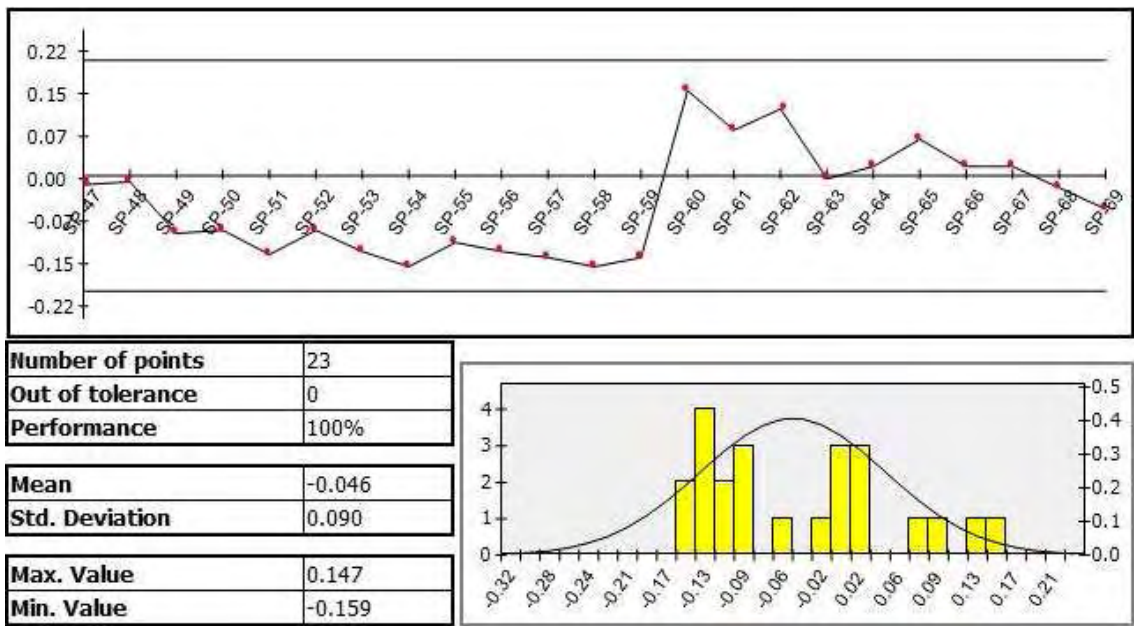


Malha Super fina

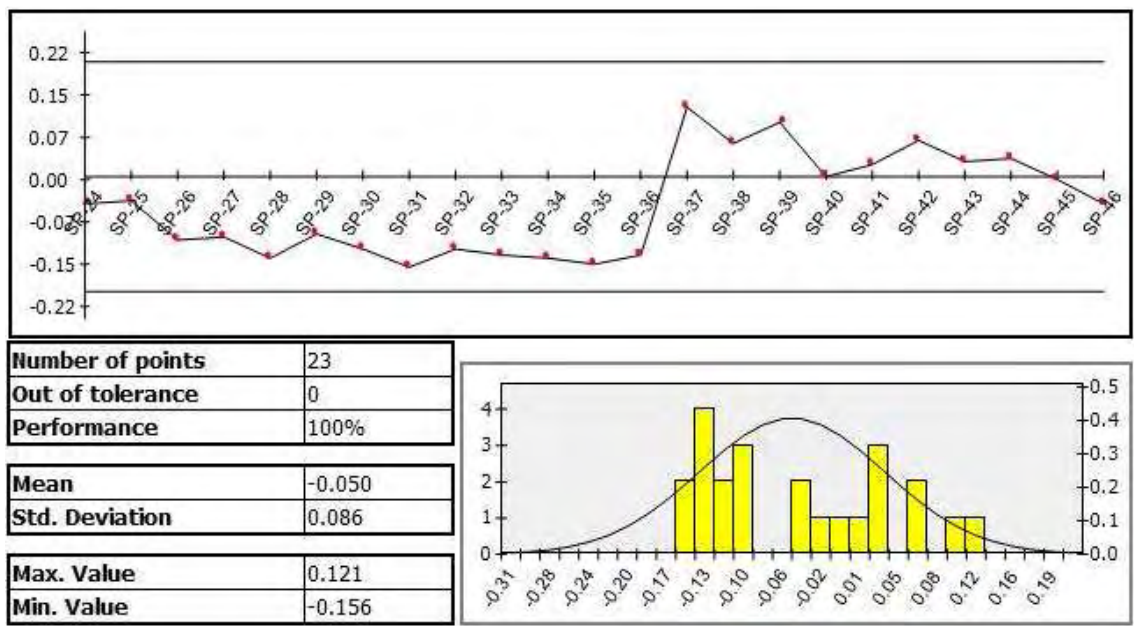


Esferas – CATIA

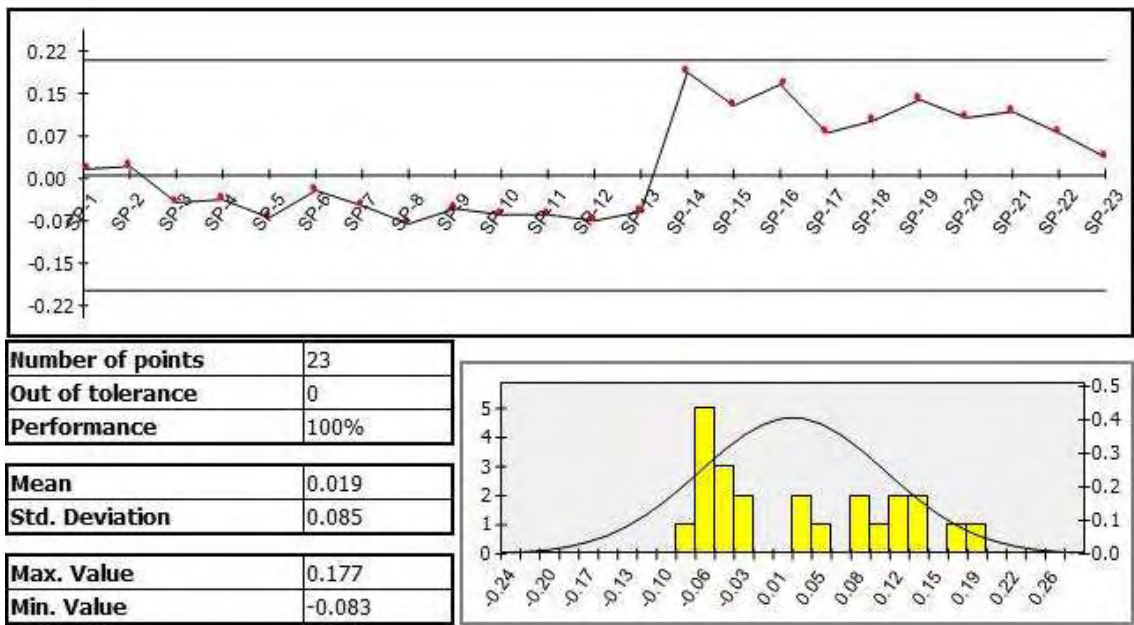
Malha grosseira



Malha fina

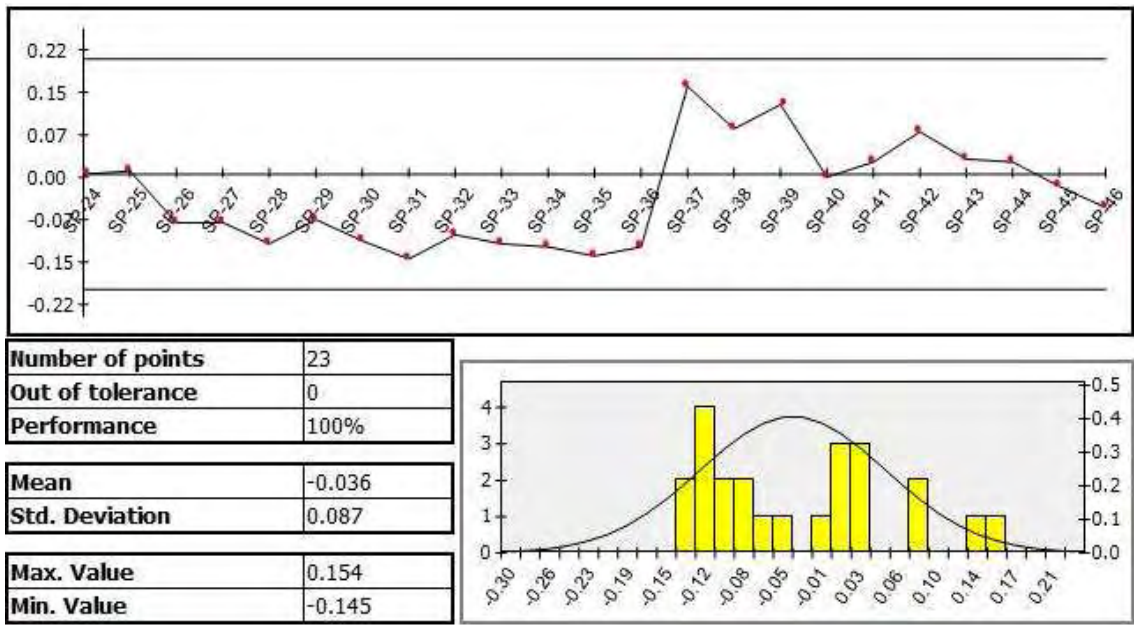


Malha super fina



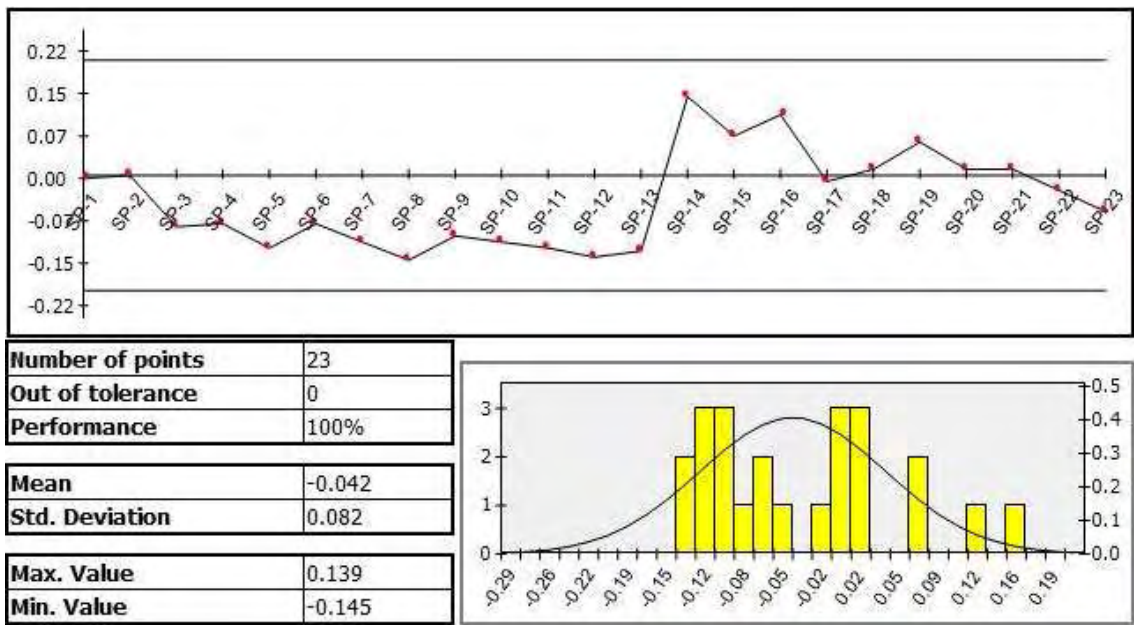
Esferas – SolidWorks

Malha grosseira

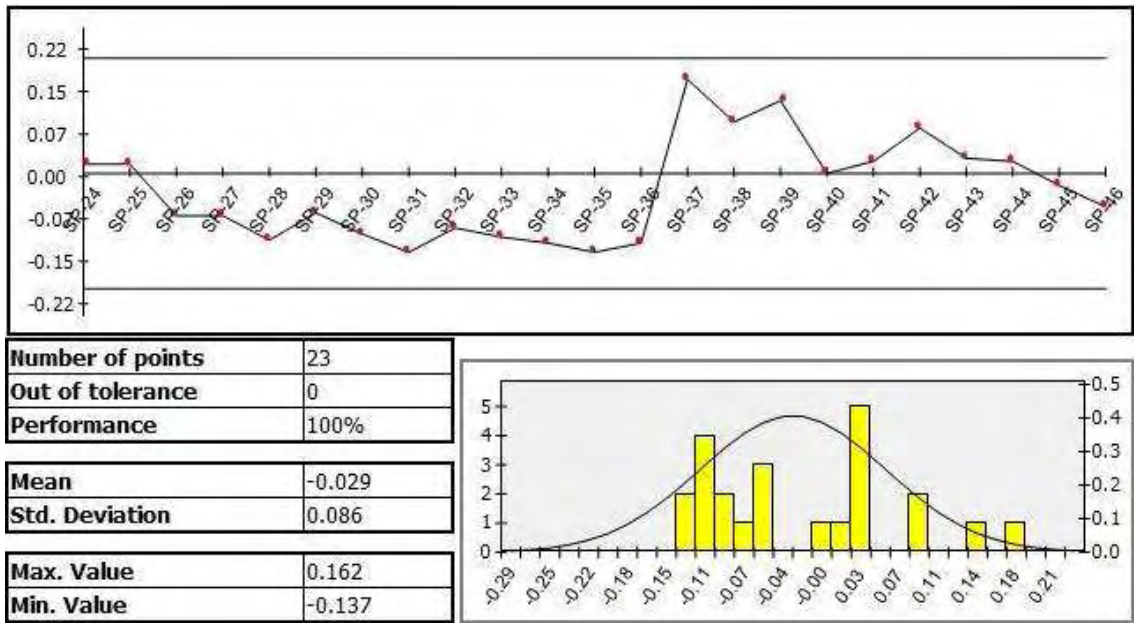




Malha fina

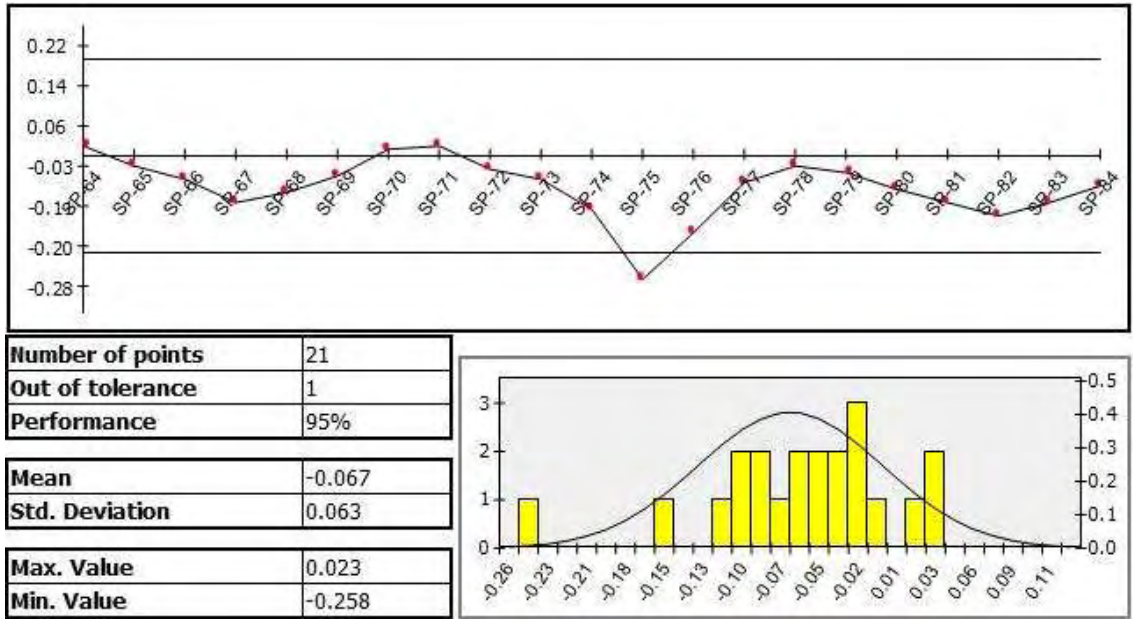


Malha super fina

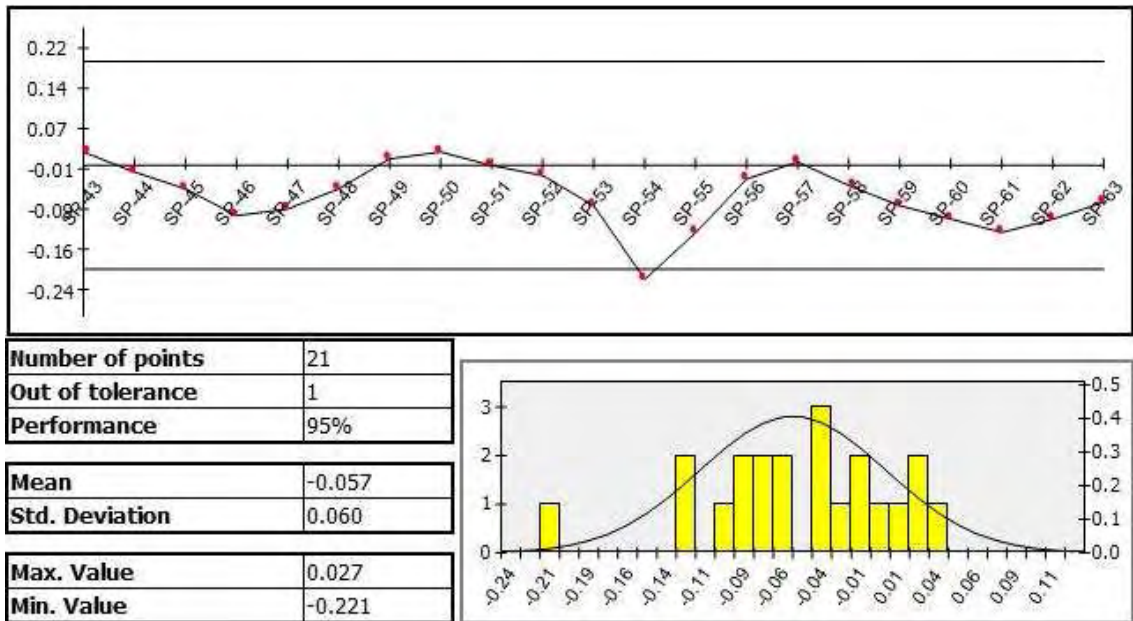


Planos – CATIA

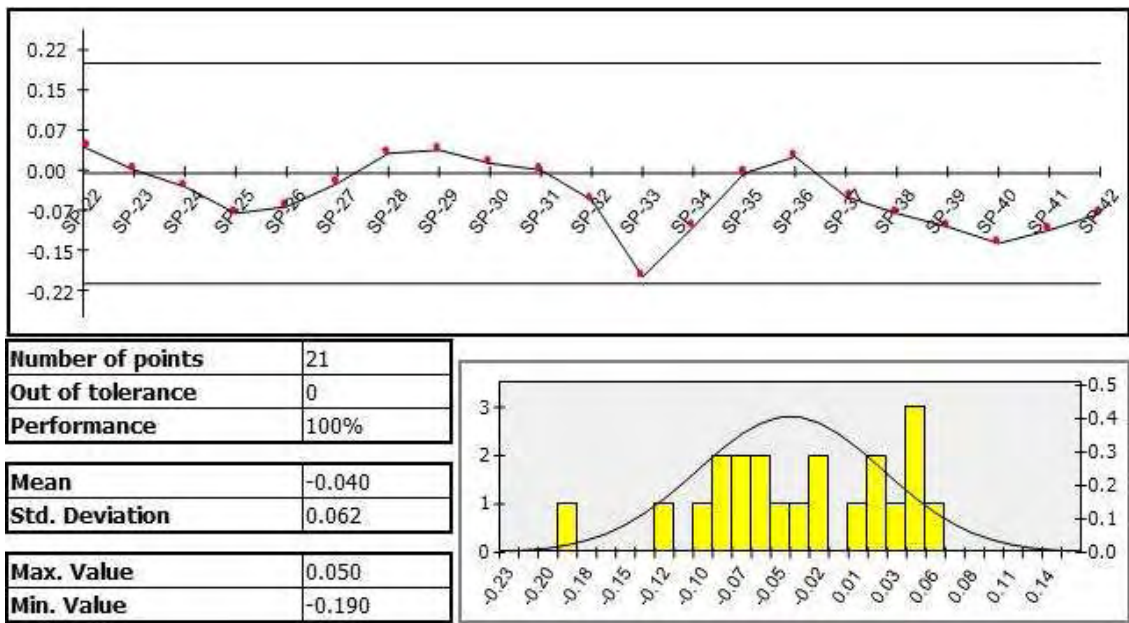
Malha grosseira



Malha fina

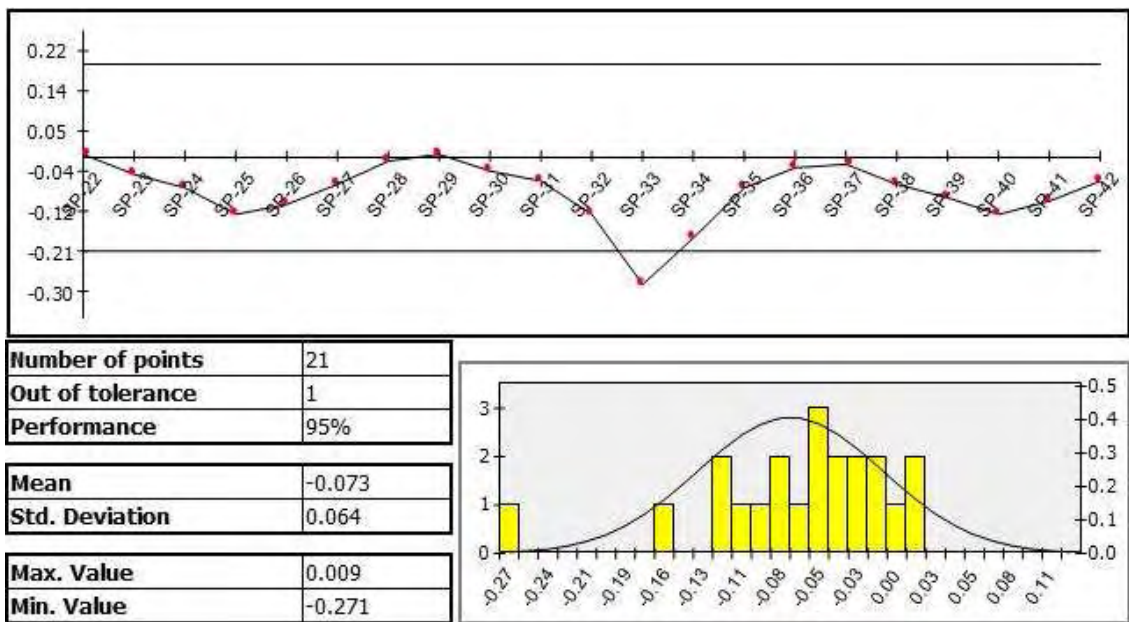


Malha super fina

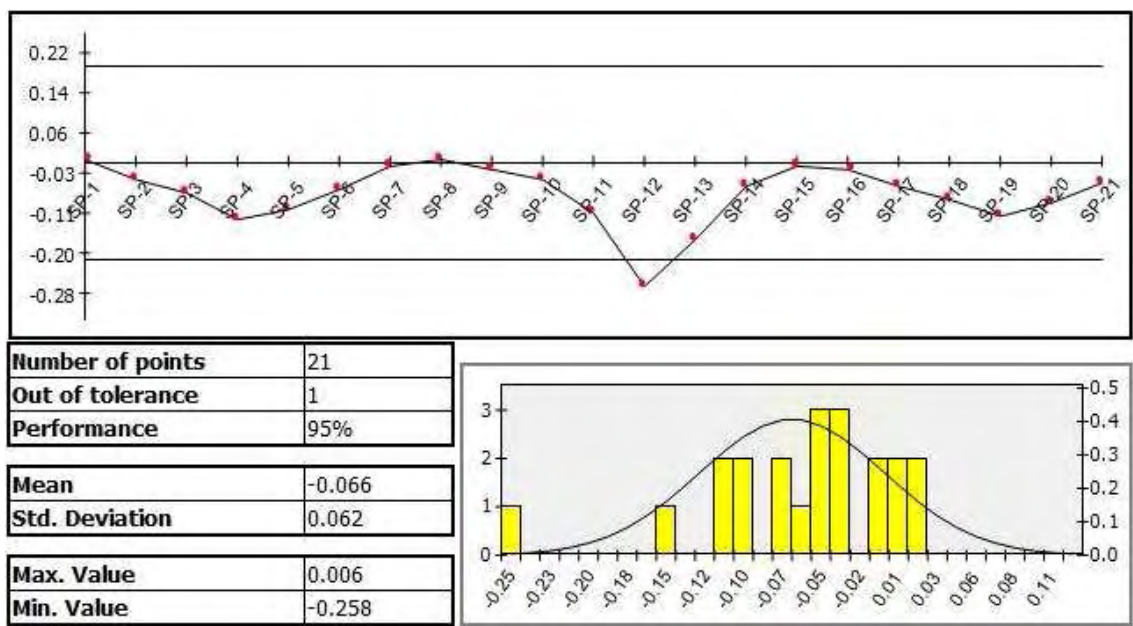


Planos – SolidWorks

Malha grosseira



Malha fina



Malha super fina

